

Über Stabilitätsbereiche der Mg-Fe^{2+} -Al-Mischkristalle rhombischer Hornblenden

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Thomas Hinrichsen

aus Lübeck

Marburg 1966

Über Stabilitätsbereiche der Mg-Fe²⁺-Al-Mischkristalle rhombischer Hornblenden

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Doktorwürde
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Thomas Hinrichsen

aus Lübeck

Marburg 1966



Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Philipps-Universität Marburg/Lahn als

Dissertation angenommen am 14. 6. 1966

Tag der mündlichen Prüfung am 2. 7. 1966

Berichterstatter: Prof. Dr. E. HELLNER

Mitberichterstatter: Prof. Dr. W. SCHMIDT

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite
Einführung	1
Experimentelle Anordnung	7
Synthese der aluminiumfreien Anthophyllite	14
Synthese der aluminiumhaltigen Anthophyllite, der Gedrite	20
a) Gedrite mit halbem maximalen Ersatz von Al für Mg, Fe und Si	20
b) Gedrite mit maximalem Ersatz von Al für Mg, Fe und Si	26
Beschreibung der auftretenden Phasen	31
Das Fe-Mg-Verhältnis koexistierender Phasen im System $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2$	37
Gleichgewichtsbeziehungen von Mineralen im System $MgO-FeO-Al_2O_3-SiO_2$ in Abhängigkeit von der Temperatur	43
a) Gleichgewichtsbeziehungen im System $MgO-Al_2O_3-SiO_2$	44
b) Gleichgewichtsbeziehungen im System $FeO-Al_2O_3-SiO_2$	46
Anwendung der Untersuchungsergebnisse auf natürliche Vorkommen rhombischer Horn- blenden	48
Zusammenfassung	53
Literaturverzeichnis	56
Anhang: Daten und Ergebnisse der Hydrothermaluntersuchungen	59

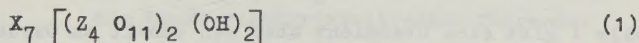


Digitized by the Internet Archive
in 2026

Einführung

Die Hornblenden sind komplex zusammengesetzte Minerale, die sich in die Gruppe der Inosilikate einordnen lassen. Die in dieser Arbeit untersuchten Hornblenden zeichnen sich durch ihren relativ einfachen Chemismus gegenüber den anderen Hornblenden aus. Untersucht wurde die Eisen-Magnesium-Mischkristallreihe der Anthophyllite und die der Gedrite.

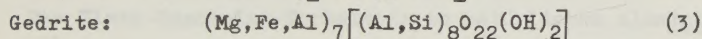
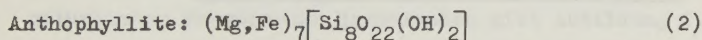
Allgemein kann man den Chemismus der Anthophyllit-Gedrit-Serie nach BERMAN (1937) mit folgender Formel beschreiben:



(X = Mg, Fe, Mn, teilweise Al)

(Z = hauptsächlich Si, teilweise Al)

Daraus leiten sich für die Mg-Fe-Mischkristallreihen der untersuchten Anthophyllite und Gedrite ohne Berücksichtigung des Mangans folgende Formeln ab:



Es können maximal 2X und 2Z durch 4 Aluminiumatome ersetzt werden. Die in der Natur vorkommenden Anthophyllite und Gedrite enthalten im allgemeinen entweder weniger als 0,5 oder mehr als 1,5 Aluminiumatome pro Formeleinheit. Es ist daher zweckmäßig zur Unterscheidung

der aluminiumarmen und aluminiumreichen rhombischen Hornblenden die Namen Anthophyllit und Gedrit beizubehalten.

Die in den hier beschriebenen Experimenten untersuchten Hornblenden sind die drei Mischkristallreihen mit folgenden Zusammensetzungen:

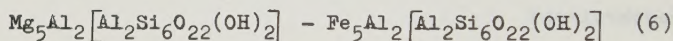
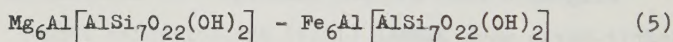
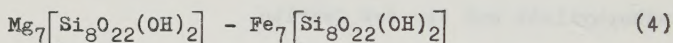


Tabelle 1 gibt eine Übersicht über den Gehalt an Oxyden in den untersuchten Mischkristallreihen.

	(Mg,Fe)O	Al ₂ O ₃	SiO ₂
(4)	46,7	-	53,3
(5)	42,8	7,2	50,0
(6)	38,5	15,4	46,1

Tab. 1

Anteile der Metalloxyde in Anthophyllit (4) und Gedriten (5), (6) in Mol-%.

Die Lage der untersuchten Mischkristallreihen im System MgO-FeO-Al₂O₃-SiO₂ zeigt Abbildung 1.

In der Natur sind nach bisher bekanntgewordenen Daten nicht sämtliche möglichen Mischkristallkombinationen der vier Endglieder der Anthophyllit-Gedrit-Serie gefunden

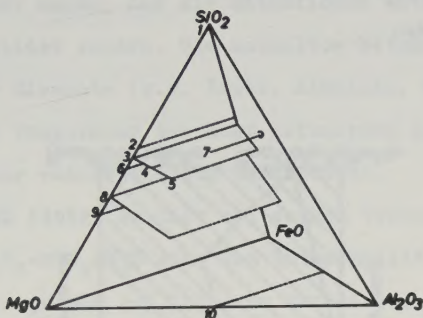


Abb. 1 Tetraedrische Darstellung des Systems $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. Die Ziffern bezeichnen die Mg-Fe-Mischkristallreihen folgender Minerale (in Mol-%):
 1 = Quarz, 2 = Talk, 3 = Anthophyllit,
 4 = Gedrit (halber max. Al-Ersatz), 5 = Gedrit (max. Al-Ersatz), 6 = Enstatit, 7 = Cordierit,
 8 = Chlorit, 9 = Olivin, 10 = Spinell.

worden. Einen Überblick über die chemische Variation natürlicher rhombischer Hornblenden gibt Abbildung 2. Das Eisen-Magnesium-Verhältnis in natürlichen aluminium-armen Anthophylliten beträgt im Durchschnitt 1 : 4. In den natürlichen Gedriten besteht eine Mischkristallreihe von einem reinen Eisen-Gedrit bis hin zu einem Gedrit mit einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 1 : 4.

Das Vorkommen von Anthophyllit und Gedrit in der Natur ist auf metamorphe Bildungen beschränkt. Beide Minerale können während der Kontaktmetamorphose (Hornblende-Hornfels-Facies) und während der Regionalmeta-

morphose (Almandin-Amphibolit-Facies) in der Erdkruste gebildet werden.

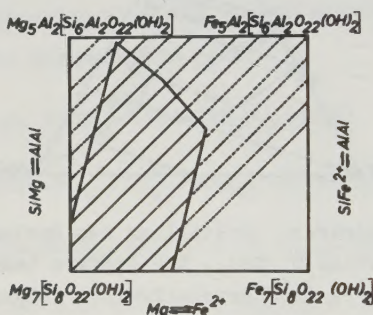


Abb. 2 Variationsbereich natürlicher rhombischer Hornblendens nach SEKI und YAMASAKI (1957). Das Gebiet mit den durchgezogenen Linien wurde nach Analysendaten von RABBITT (1948) bestimmt. Der Bereich der gestrichelten Linien wird von SEKI und YAMASAKI als Existenzbereich natürlicher rhombischer Hornblendens angesehen.

BOWEN und TUTTLE (1949) untersuchten das System $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. Sie konnten aus synthetischem Talk Anthophyllit und geringe Mengen Quarz herstellen. (800°C , 1000 Bar). Bei dreistündiger Reaktionsdauer setzte sich der Anthophyllit in Enstatit + Quarz um. Da keine Bedingungen gefunden wurden, unter denen Anthophyllit stabil ist, nahmen Bowen und Tuttle an, daß Anthophyllit im H_2O -Überschuß nicht stabil ist. Bowen und Tuttle wollen

damit aber nicht sagen, daß die natürlichen Anthophyllite metastabil gebildet wurden. Sie enthalten beträchtliche Mengen anderer Elemente (z.B. Eisen, Alkalien, Mangan usw.), die die Temperatur der hier gefundenen Bildungsbedingungen sehr wahrscheinlich herabsetzen.

H.S. YODER (1952) erhielt bei seinen Versuchen im System $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ eine dem Anthophyllit ähnliche Phase, die sich jedoch bei längerer Versuchsdauer als nicht stabil erwies.

In der Arbeit von ROY und ROY (1955) über das System $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ wird erwähnt, daß Hornblenden der Anthophyllit-Gedrit-Mischkristallreihe nicht synthetisiert werden konnten.

FYFE (1962) gelang es mit nicht analysierten Impfkristallen Anthophyllit zum Wachsen zu bringen, und er bestätigte damit, daß der Anthophyllit ein Stabilitätsfeld besitzen muß.

GREENWOOD (1963) stellte Anthophyllit her. Dies gelang ihm jedoch nicht aus einem Oxyd-Gemisch. Er erklärt dies durch das Vorhandensein einer kinetischen Barriere, die jede Reaktion behindert, bei der Anthophyllit entsteht. Der Anthophyllit wächst seiner Meinung nach so langsam in seinem Stabilitätsfeld, daß keine erkennbare Menge Anthophyllit entsteht. Erst die hydrothermale Behandlung von bei 650°C hergestellten Talk + Quarz oder Forsterit + Talk bei Temperaturen von 830°C (20 Stunden, 1000 Bar) ergab ungefähr 20 % Anthophyllit,

10 % restlichen Talk $\pm$ Forsterit und ein Rest von Klinoenstatit + Cristobalit.

BOYD (1954) hat bei seinen Untersuchungen in der Hornblendegruppe auch die Anthophyllite hydrothermal untersucht. Er konnte Anthophyllite mit verschiedenen Fe/Mg-Verhältnissen synthetisieren. Die Phasen wuchsen schnell, besonders die Fe-reichen Zusammensetzungen. Der Fe-reichste Anthophyllit enthält $\text{Fe}_{60}\text{Mg}_{40}$. Bei höheren Eisengehalten tritt immer Olivin zusätzlich auf. Der Mg-Anthophyllit konnte von Boyd 50° C über der Zersetzungstemperatur von Talk bei 1000 Bar H_2O -Druck hergestellt werden. Er ist für eine Woche beständig, dann zersetzt er sich in Enstatit + Quarz. Die eisenhaltigen Anthophyllite zeigen diese Erscheinung nicht. Sie bleiben auch nach dreiwöchigen Versuchen stabil. Die Herstellung von Anthophyllit aus Enstatit und Quarz gelang Boyd nicht.

FAWCETT und YODER (1962) hatten keinen Erfolg im System $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ einen aluminiumhaltigen Anthophyllit in Richtung auf den Gedrit hin hydrothermal herzustellen. Sie erhielten stattdessen bei höheren Temperaturen bis 700° C die Paragenese Chlorit + Cordierit + Talk.

Experimentelle Anordnung

Die Ausgangssubstanzen für die hier beschriebenen Hydrothermalversuche sind Pulvergemische, die aus folgenden chemischen Verbindungen zusammengesetzt sind:

Eisenoxalat ($\text{Fe}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

hergestellt im Min. Inst. Marburg

Magnesiumoxalat ($\text{Mg}(\text{C}_2\text{O}_4) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

hergestellt im Min. Inst. Marburg

Aluminiumhydroxyd ($\text{Al}(\text{OH})_3$, Bayerit), reinst

Merck 1093

Kieselsäure (SiO_2), rein, H_2O -frei

Riedel-de-Haën 13719

Natriumcarbonat (Na_2CO_3), p.a., H_2O -frei

Merck 6392

Alle diese Verbindungen wurden chemisch analysiert, um die genaue Zusammensetzung sicherzustellen. Das Aluminiumhydroxyd zeigt eine geringe Abweichung von der theoretischen Zusammensetzung. Für die Einwaagen wurde daher ein Korrekturfaktor angebracht.

Die Ausgangssubstanzen wurden durch Mischen der in jeweilig erforderlichen Verhältnis eingewogenen chemischen Verbindungen unter Azeton hergestellt. Die Homogenität wurde unter dem Mikroskop kontrolliert. Von den Ausgangsmischungen wurden ungefähr 20 mg zusammen mit der für die jeweilige Temperatur und den jeweiligen Druck erforder-

lichen Menge Wasser in ein Untersuchungsröhrchen eingefüllt, und dieses wurde zugeschweißt. Es fanden gezogene Gold- und Silberrohre von 3 oder 4 mm Durchmesser Verwendung. Die Dichtigkeit der Röhrchen wurde über die Gewichtskonstanz im Trockenschrank bei 100° C kontrolliert. Die dichten Untersuchungsröhrchen wurden dann in den Hochdruckbehälter gebracht.

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Hydrothermaluntersuchungen wurden hauptsächlich in geschlossenen Bomben des "Morey-Typs", teilweise jedoch auch zur besseren Druckkontrolle und wegen der höheren Temperaturbelastbarkeit in offenen, an eine Hochdruckpumpe angeschlossenen Bombenkörpern ausgeführt. Als Bombenmaterial standen mehrere hochwarmfeste Legierungen zur Verfügung (PMWC Ti, Vakuumschmelze, Hanau; Haynes alloy No. 25 und René 41, bezogen von Firma Zapp, Düsseldorf).

Bis zu Temperaturen von 660° C wurden zur Heizung der geschlossenen Bomben Trockenschränke verwendet, die eine höhere Temperaturkonstanz als kleine speziell für Hydrothermalversuche hergestellte Öfen haben, und außerdem kein Temperaturgefälle aufweisen. Über 660° C wurden kleine liegende Öfen benutzt, die zur Wärmeisolation an beiden Enden mit Quarzwolle hermetisch verstopft waren. Hier ist die Temperaturkonstanz im Heizraum nicht so groß wie in den Trockenschränken.

Die Temperaturmessung wurde mit Pt-PtRh-Thermoelementen durchgeführt, und die Meßwerte wurden mit einem

Kompensationsschreiber gemessen und registriert. Nach Berechnung aller Fehler wurde die mit den geeichten Thermoelementen gemessene Temperatur in den Trockenschränken auf $\pm 5^{\circ}\text{C}$ genau bestimmt, die in den liegenden Hydrothermalöfen mit $\pm 10^{\circ}\text{C}$. Alle in dieser Arbeit enthaltenen Temperaturangaben sind auf mindestens $\pm 10^{\circ}\text{C}$ genau. Abbildung 3 zeigt die Genauigkeit der Messungen bei verschiedenen Temperaturen.

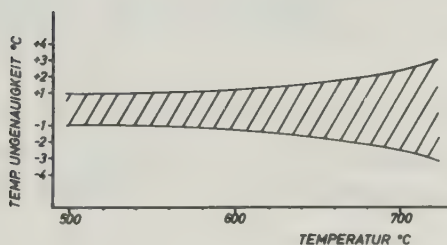


Abb. 3 Abweichung der am Schreiber angezeigten Temperatur von der tatsächlichen Temperatur (gemessen mit geeichtem Thermoelement und Kompensationsvoltmeter).

Die Hydrothermaluntersuchungen wurden meist bei 1000 Bar Wasserdampfdruck durchgeführt. Die Druckgenauigkeit in den geschlossenen Bomben ist nicht sehr groß

und schwankt, besonders bei den höheren Temperaturen, um ungefähr ± 100 Bar, also um $\pm 10\%$ (Abbildung 4).

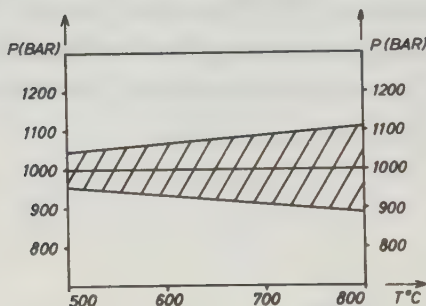


Abb. 4 Druckgenauigkeit in den geschlossenen Bomben in Abhängigkeit von der Temperatur.

Die für die jeweilige Temperatur und den jeweiligen Druck erforderliche Wassermenge wurde aus den Tabellen von HOLSER und KENNEDY (1959) berechnet. Eine grobe Kontrolle, ob der Druck über die Dauer des Versuches konstant war, ist möglich, wenn das eingefüllte Wasser nach dem Versuch ausgelitert wird. Die Synthesen in der offenen Hochdruckanlage haben eine Druckgenauigkeit von ± 50 Bar bei 1000 Bar, also $\pm 5\%$.

Die meisten hier beschriebenen Versuche hatten eine Dauer von 7 Tagen; in einzelnen Fällen wurde die Versuchsdauer auf einige Stunden verkürzt, in anderen auf 10 Wochen ausgedehnt.

Abweichend von den normalen Hydrothermalversuchen spielt bei den Untersuchungen eisenhaltiger Mischkristallreihen oder Mineralien der Oxydationsgrad des Eisens eine wichtige Rolle. In den hier beschriebenen Versuchen wurde unter reduzierenden Bedingungen gearbeitet, das bedeutet, daß das Eisen immer in zweiwertiger Form vorlag. Die Kontrolle des Sauerstoffpartialdruckes, der für den Oxydationsgrad verantwortlich ist, bewirken die sogenannten Puffer. Hier wurden Mischungen aus Eisen und Magnetit oder Wüstit und Magnetit benutzt, die die Probe umschließen. Solange nach dem Versuch noch Eisen bzw. Wüstit im Puffermaterial vorhanden ist, ist die vom Puffer umschlossene Probe nicht oxydiert.

Zusätzlich zu der Pufferwirkung des Eisens und des Wüstits treten noch die reduzierenden Eigenschaften der Oxalatgemische hinzu. Bei der Zersetzung des Oxalates bilden sich Kohlendioxyd und Kohlenmonoxyd. Diese stehen mit Wasser in folgendem Gleichgewicht:



Unter 830° C verschiebt sich das Gleichgewicht nach rechts, so daß eine zusätzliche Pufferwirkung des Wasserstoffes im Reaktionsraum erfolgt. Da das Kohlenmonoxyd gleichzeitig zu Kohlendioxyd oxydiert wird, besteht die Dampfphase im Versuchsröhrchen zur Hauptsache aus einem Gemisch von Kohlendioxyd, Wasserdampf und Wasserstoff. Einen ungefähren Eindruck über die Größe des Kohlendioxyd-

partialdruckes vermittelt Abbildung 5. Die Werte gelten für ein Standardröhrchen von 3 mm Durchmesser und 30 mm Länge.

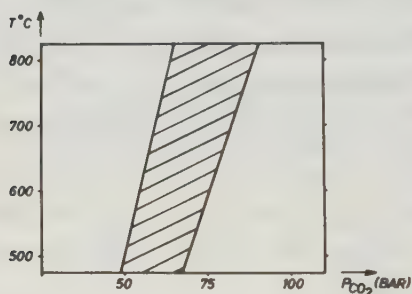


Abb. 5 Kohlendioxydpartialdruck im Versuchsröhrchen in Abhängigkeit von der Temperatur. Die höchsten Drucke treten bei der Ferro-Anthophyllit-Mischung auf (rechte Kurve), die niedrigsten bei der Mg-Gedrit-Mischung mit max. Al-Ersatz (linke Kurve). Im gestrichelten Gebiet liegt der CO_2 -Druck der übrigen Mischungen.

Die hydrothermal synthetisierten Proben wurden nach den Versuchen den Untersuchungsröhrchen entnommen und optisch und röntgenographisch untersucht.

Bei Vorversuchen hatte es sich gezeigt, daß im System $\text{FeO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ kein Gedrit synthetisiert

werden konnte. Nach dem Studium der in der Literatur vorhandenen Analysen zeigte sich, daß die Gedrite fast immer beträchtliche Mengen Alkalien (hauptsächlich Natrium) enthalten. Nach RABBITT (1948) besteht kein Zweifel, das Natrium in die Kristallstruktur der rhombischen Hornblenden eingebaut werden kann. WHITTAKER (1960) bestätigt dieses in seiner Arbeit über die Kristallchemie der Amphibole. Zum gleichen Ergebnis kommen LAYTON und PHILLIPS (1961). Sie sagen, daß Anthophyllite und Gedrite geringe Mengen Natrium und Calcium aufnehmen können.

Es wurden daher Versuche mit Beimengungen von 4 Mol-% Natrium - gerechnet auf die Gesamtformel - begonnen. Hier bildete sich neben Hornblenden unter anderen Mineralen fast immer ein Natriumsilikat (meist Albit). Nachdem der Zusatz an Natrium auf 2 Mol-% gesenkt wurde zeigten sich keine typischen Natriumsilikate mehr.

Synthese der aluminiumfreien Anthophyllite

Die hydrothermalen Untersuchungen über die Eisen-Magnesium-Mischkristallreihe der aluminiumfreien Anthophyllite wurden bei Temperaturen zwischen 500° C und 700° C ausgeführt. Der Wasserdampfdruck betrug 1000 Bar. Der durch das im Ausgangsmaterial enthaltene Eisen- bzw. Magnesiumoxalat entstehende CO₂-Druck läßt sich aus Abbildung 5 für die verschiedenen Temperaturen ermitteln.

Die Versuche wurden unter reduzierenden Bedingungen ausgeführt. Für Temperaturen unterhalb 570° C wurden als Puffersubstanzen Eisen und Magnetit benutzt. Oberhalb 570° C kam ein Wüstit-Magnetit-Puffer zur Anwendung. Es zeigte sich, daß mit Puffermengen von 1 - 2 g eine reduzierende Wirkung über eine Woche aufrechterhalten werden konnte. Bei längeren Versuchen mußte die Menge des Puffers vergrößert werden. Die Puffer wurden ebenso wie die hydrothermal behandelten Proben nach den Versuchen röntgenographisch untersucht, um zu sehen, ob in der Puffersubstanz noch Eisen bzw. Wüstit enthalten ist.

Die Versuchsdauer betrug bei der Untersuchung der aluminiumfreien Mischkristallreihe der Anthophyllite im Durchschnitt eine Woche. Um die Stabilitätsverhältnisse auf der Magnesiumseite zu klären, wurde die Dauer einzelner Versuche auf 6 Wochen ausgedehnt.

Die in den Versuchen auftretenden Phasen sind:

Anthophyllit	$(\text{Mg}, \text{Fe})_7 [\text{Si}_8 \text{O}_{22} (\text{OH})_2]$
Talk	$(\text{Mg}, \text{Fe})_3 [\text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2]$
Olivin	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2 [\text{SiO}_4]$
Pyroxen	$(\text{Mg}, \text{Fe}) [\text{SiO}_3]$
Quarz	SiO_2

Die Versuchspunkte mit den Ergebnissen sind aus Abbildung 6 zu ersehen. Das aus den experimentellen Daten abgeleitete pseudobinäre t-x-Diagramm ist in Abbildung 7 wiedergegeben. Der Schnitt ist stark vereinfacht, da es sich eigentlich um ein 5-Komponentensystem handelt. Der niedrigste Stabilitätspunkt des Anthophyllits liegt bei $520^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ bei einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 60 : 40. Gleichzeitig ist der an diesem Punkt synthetisierte Anthophyllit der eisenreichste, der im aluminiumfreien System synthetisiert werden konnte. Geht man mit dem Eisen-Magnesium-Verhältnis über diesen Punkt hinaus, so erhält man zusätzlich Olivin + Quarz, bis schließlich der Anthophyllit nicht mehr stabil ist, und nur Olivin + Quarz auftreten. Ein reiner Ferro-Anthophyllit konnte also bei diesen Untersuchungen nicht synthetisiert werden. Dies stimmt mit den Beobachtungen in der Natur überein, wo bisher kein reiner Ferro-Anthophyllit gefunden wurde.

Das auf der eisenreichen Seite des Diagramms auftretende Übergangsfeld mit Anthophyllit + Olivin + Quarz geht oberhalb von 630°C in drei Felder über. Das erste dieser Felder enthält Pyroxen + Quarz + Anthophyllit als

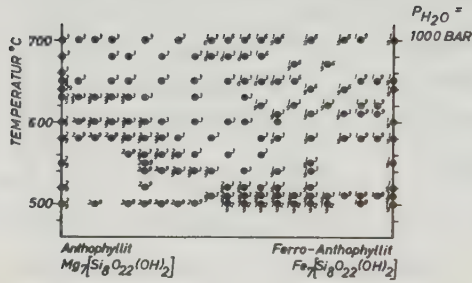


Abb. 6 Versuchspunkte auf der Anthophyllit-Ferro-Anthophyllit-Mischkristallreihe. (Ziffern-erklärung siehe Abb. 1)

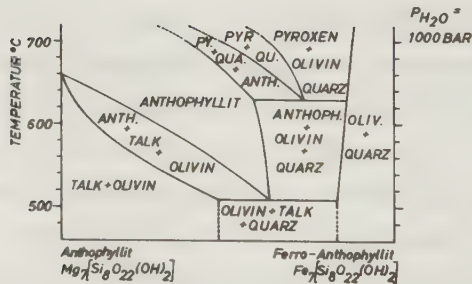


Abb. 7 Aus den Versuchspunkten abgeleitetes pseudo-binäres t-x-Diagramm der Anthophyllit-Mischkristallreihe.

Übergang zum Anthophyllitfeld. Das zweite bildet den Übergang zwischen dem Feld mit Anthophyllit + Pyroxen + Quarz und dem mit Pyroxen + Olivin + Quarz und enthält Pyroxen + Quarz.

Unterhalb von 520°C existiert ein Übergangsfeld zwischen dem Feld Talk + Olivin und dem Feld Olivin + Quarz. In diesem Gebiet koexistieren Talk + Olivin + Quarz.

Um die Eisen-Magnesium-Verteilung in den einzelnen Phasen bei verschiedenen Temperaturen zu zeigen, wurden die pseudobinären Schnitte der aluminiumfreien Anthophyllitserie in ein Dreikomponentensystem mit den Eckpunkten MgO , FeO und SiO_2 übertragen. Dabei wurden zwei Komponenten (H_2O , CO_2) vernachlässigt; der Druck beträgt einheitlich 1000 Bar.

Bei 500°C (Abb. 8) tritt Anthophyllit noch nicht auf. Auf der Magnesium-Seite bilden Olivin + Talk ein großes binäres Gebiet, in dem der Talk maximal 35 % FeO und der Olivin maximal 85 % FeO aufnehmen. Es folgt dann ein Dreiphasengebiet mit Quarz + Talk + Olivin, und von einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 85 : 15 ab tritt ein Zweiphasengebiet mit Olivin + Quarz auf.

Bei einer Temperatur von 600°C (Abb. 9) nimmt der Anthophyllit, der schon bei $520^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ erstmals auftritt, breiten Raum ein. Er ist stabil von einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 30 : 70 bis ungefähr 60 : 40. Zur eisenreichen Seite hin wird der Existenzbereich des

Anthophyllit durch ein Übergangsfeld, in dem neben Anthophyllit Olivin + Quarz stabil sind, abgelöst. In diesem Feld hat der Anthophyllit ein Eisen-Magnesium-Verhältnis von ungefähr 60 : 40 und der Olivin eines von ungefähr 90 : 10. Noch eisenreichere Zusammensetzungen liegen dann wieder in einem binären Feld, das von Quarz + Olivin begrenzt wird. Zur magnesiumreichen Seite hin bildet sich ein Übergangsfeld mit Anthophyllit + Olivin + Talk. Hier enthält der Talk mit 5 % wesentlich weniger FeO als bei 500° C. Der Anthophyllit hat im Übergangsfeld ein Eisen-Magnesium-Verhältnis von 30 : 70 und der Olivin eines von 40 : 60. In Richtung auf das Magnesium-Endglied der Anthophyllitreihe tritt im Anschluß an das Übergangsfeld ein Binärfeld mit Talk + Olivin auf.

Eine Temperaturerhöhung von 100° C (700° C, Abb. 10) ändert das Aussehen der Felderaufteilung vollkommen. Der Anthophyllit ist bis zu seinem Magnesium-Endglied hin stabil. Zwar treten bei den Hydrothermalversuchen zusätzlich immer noch Pyroxen + Talk auf, es kann in längeren Versuchen jedoch gezeigt werden, daß sie metastabil gebildet wurden. Bis zu einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 40 : 60 ist der Anthophyllit stabil. Dann wird er abgelöst von einem Feld mit Anthophyllit + Pyroxen + Quarz, weiter zur eisenhaltigen Seite hin treten die Felder mit Pyroxen + Quarz, Pyroxen + Olivin + Quarz und Olivin + Quarz auf.

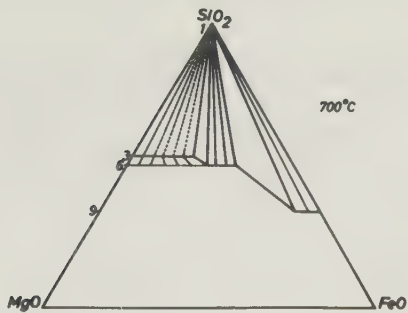
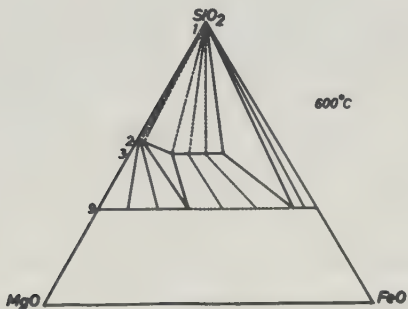
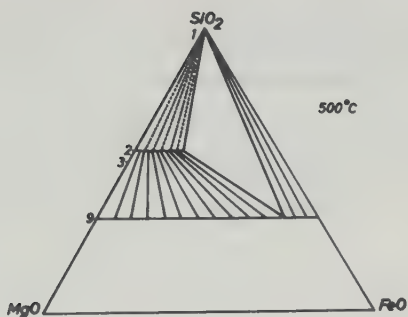


Abb. 8-10

Felderaufteilung im System MgO-FeO-SiO₂
bei 500° C, 600° C und 700° C und 1000 Bar
H₂O-Druck. (Ziffernerklärung siehe Abb. 1)

Synthese der Gedrite

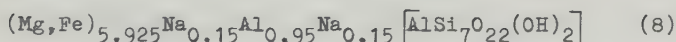
Die hydrothermale Synthese der aluminiumhaltigen Anthophyllite in Richtung auf den Gedrit hin gelang im System $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ nicht. Phasen, die einer rhombischen Hornblende ähnelten, traten in Vorversuchen zwar auf, es stellte sich jedoch heraus, daß diese Hornblenden metastabil gebildet und bei längerer Versuchsdauer wieder abgebaut wurden. Ein geringer Gehalt an Alkalien stabilisiert jedoch den Gedrit.

Es wurden zwei Eisen-Magnesium-Mischkristallreihen mit unterschiedlichem Gehalt an Aluminium untersucht. Einmal die Mischkristallreihe der Gedrite mit der Hälfte des maximal möglichen Aluminium-Ersatzes und zum zweiten die der Gedrite mit maximalem Aluminium-Ersatz. Beide aus den experimentellen Daten abgeleiteten pseudobinären t-x-Diagramme sehen ähnlich aus, sie sollen aber getrennt beschrieben werden.

Gedrite mit halbem maximalen Ersatz von Al für Mg, Fe und Si

Die hydrothermalen Untersuchungen in diesem System wurden bei Temperaturen zwischen 500°C und 700°C ausgeführt. In einzelnen Versuchen wurde die Temperatur bis 800°C erhöht. Der Druck betrug immer 1000 Bar. Zur hydrothermalen Synthese wurden geschlossene und offene Bomben benutzt, letztere häufig zur Druckkontrolle. Bei eisenhaltigen Ausgangsmischungen wurden Puffer zur Kontrolle des Sauerstoffpartialdruckes verwendet.

Die Ausgangsmischungen hatten folgende Zusammensetzungen:



(Siehe Punkt 4 in Abb. 1, wobei das Natrium nicht berücksichtigt wurde.)

Abbildung 11 zeigt die Versuchspunkte und Abbildung 12 das aus den Versuchspunkten abgeleitete pseudobinäre t-x-Diagramm.

Die tiefste Temperatur, bei der ein Gedrit synthetisiert werden konnte, liegt bei $580^\circ \text{C} \pm 10^\circ \text{C}$ und 1000 Bar H_2O -Druck. Das Eisen-Magnesium-Verhältnis beträgt in diesem Falle 100 : 0, das bedeutet, daß es sich um das reine Eisenendglied der untersuchten Mischkristallreihe handelt. Im Gegensatz hierzu konnte auf der aluminiumfreien Mischkristallreihe der Anthophyllite kein reiner Ferro-Anthophyllit synthetisiert werden. Stattdessen trat Olivin und Quarz auf.

Von 580°C ab steigt die untere Stabilitätsgrenze des Gedrites mit zunehmenden Magnesium-Gehalt steil an und erreicht bei 680°C und einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 35 : 65 einen Punkt, in dem sich die Begrenzungslinien mehrerer Felder schneiden. Von hier an wird die Kurve noch steiler. Der magnesiumreichste Gedrit, der bei 700°C und 1000 Bar H_2O -Druck synthetisiert werden konnte, hat ein Eisen-Magnesium-Verhältnis von 30 : 70. Versuche, die ausgeführt wurden, um das Magnesium-Endglied der

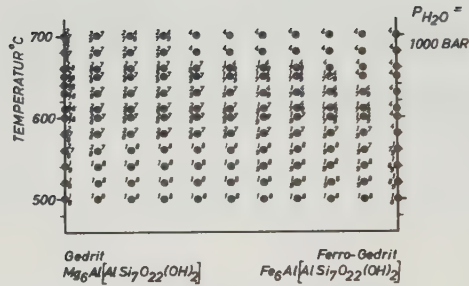


Abb. 11 Versuchspunkte auf der Mischkristallreihe der Gedrite mit halbem max. Al-Ersatz (Ziffern-erklärung siehe Abb. 1).

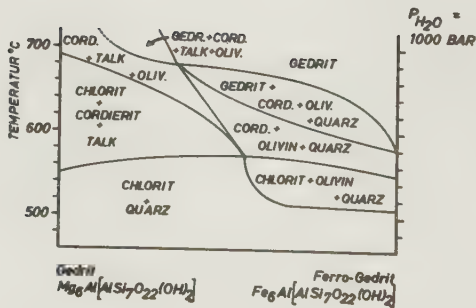
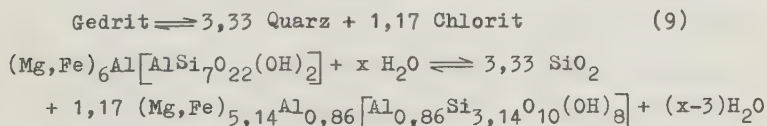


Abb. 12 Abgeleitetes pseudobinäres t-x-Diagramm der Gedrite mit halbem max. Al-Ersatz.

Mischkristallreihe zu synthetisieren, hatten keinen Erfolg. Zwar zeigten die Ergebnisse von Versuchen bei 800° C, daß sich eine Hornblendephase gebildet hatte. Diese schien aber metastabil zu sein. Dies Ergebnis stimmt mit den Untersuchungen von FAWCETT und YODER (1962) überein, die zwischen 700° C und 850° C ebenfalls metastabile rhombische Hornblenden (Gedrite?) bei ihren Hydrothermalversuchen erhielten. In der Natur sind Gedrite dieser Zusammensetzung bisher noch nicht gefunden worden. Ob eventuell anderer Kationenersatz außer Natrium (Calcium?) die Bildungstemperatur noch weiter herunterdrücken kann, wurde in der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

Bei tiefen Temperaturen um 500° C herum erhält man anstelle des Gedrites Chlorit + Quarz. Die Chlorite sind etwas aluminiumärmer als die der Klinochlor-Daphnit-Mischkristallreihe. Die Bildung läßt sich mit folgender Formel beschreiben (ohne Berücksichtigung des Natriums):



Das Existenzfeld der Paragenese Chlorit + Quarz hat bei einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 55 : 45 sein Maximum bei 570° C $\pm$ 10° C und fällt zur Eisenseite auf 510° C $\pm$ 10° C und zur Magnesiumseite auf 550° C $\pm$ 10° C ab.

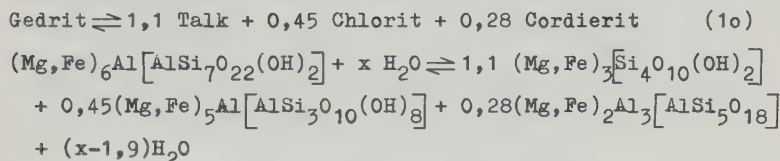
Bei 2000 Bar fanden FAWCETT und YODER das Maximum des Chlorit-Quarz-Feldes bei 575° C. Die gefundene Temperatur

stimmt also gut mit den Angaben von FAWCETT und YODER überein.

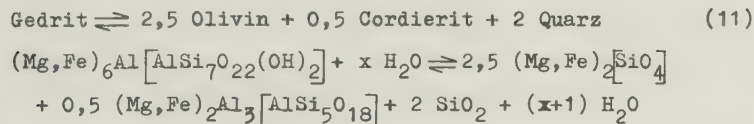
Der auf der eisenreichen Seite gebildete Chlorit geht bei höherer Temperatur in einen aluminiumreicheren Chlorit über, wobei sich aus dem überschüssigen Magnesium- und Eisenoxyden zusammen mit Quarz als zusätzliche Phase Olivin bildet. Bei bisherigen Untersuchungen der Chloritreihe hatte sich gezeigt, daß die Glieder mit halbem maximalen Aluminiumersatz (entsprechend den Endgliedern Daphnit und Klinochlor) die stabilsten Glieder der Chloritreihe sind (YODER 1952; NELSON und ROY 1958; HELLNER, HINRICHSSEN, SEIFERT 1965). Man kann daher annehmen, daß die im Feld mit Chlorit + Quarz + Olivin gebildeten Chlorite auf der Daphnit-Klinochlor-Mischkristallreihe liegen. Da das Eisen-Magnesium-Verhältnis der Ausgangssubstanz bekannt ist, und das des Olivins gemessen werden kann (YODER und SAHAMA 1957), ist es auch möglich, das Eisen-Magnesium-Verhältnis der Chlorite in diesem Feld zu berechnen.

Auf der Magnesiumseite geht die Vergesellschaftung von Chlorit + Quarz in ein ausgedehntes Feld mit Chlorit + Cordierit + Talk über. Der Cordierit bildet sich auf Kosten des Chlorites und ist außerdem der Hauptfänger für das Eisen. Das reine Magnesium-Endglied der Cordierit-Mischkristallreihe bildet sich hier bei $550^{\circ} \text{C} \pm 10^{\circ} \text{C}$. Nimmt man die Bildung von Klinochlor (bzw. die Bildung von Mischkristallen der Klinochlor-Daphnit-Reihe) auch in diesem Feld an, so kann man den Bildungsmechanismus

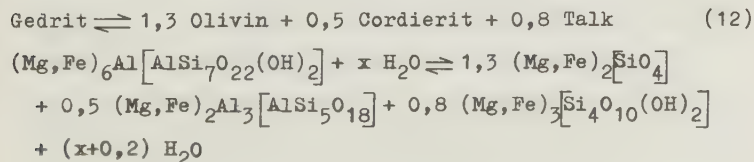
mit folgender Formel beschreiben (ohne Berücksichtigung des Natriums):



Auf der Eisenseite wird das Existenzfeld von Chlorit + Quarz + Olivin abgelöst von der Vergesellschaftung Cordierit + Quarz + Olivin. Auch hier bildet sich der Cordierit auf Kosten des Chlorites. Der reine Eisen-Cordierit wurde bei $550^\circ \text{ C} \pm 10^\circ \text{ C}$ synthetisiert. Die Bildungsgleichung lautet in diesem Falle (ohne Berücksichtigung des Natriums):



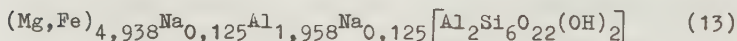
Zwischen die Felder mit Chlorit + Cordierit + Talk und mit Cordierit + Olivin + Quarz schiebt sich ab $570^\circ \text{ C} \pm 10^\circ \text{ C}$ ein Feld mit Cordierit + Talk + Olivin. Es läßt sich folgende Reaktionsgleichung aufstellen (ohne Berücksichtigung des Natriums):



Zum Existenzfeld des Gedrites leiten zwei Übergangsfelder hin. Das eine enthält neben Gedrit, Cordierit + Olivin + Quarz. Im anderen koexistieren Gedrit + Cordierit + Talk + Olivin. Der Gedrit hat in dem untersuchten Temperaturbereich nur ein kleines Stabilitätsfeld. Zwar deuten Versuche bis 800°C an, daß auf der eisenreichen Seite der Gedrit weiterhin stabil bleibt, auf der Magnesiumseite liegen die Dinge jedoch wesentlich komplizierter und konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden.

Gedrite mit maximalem Ersatz von Al für Mg, Fe und Si

Die untersuchten Gedrite mit maximalem Aluminiumersatz hatten folgende Zusammensetzung (siehe Punkt 5 in Abb. 1; ohne Berücksichtigung des Natriums):



Dabei wurde das Eisen-Magnesium-Verhältnis von 100 : 0 bis 0 : 100 in Abstufungen von 10 % variiert. Die hydrothermalen Synthesen auf dieser Mischkristallreihe wurden bei Temperaturen zwischen 490°C und 700°C ausgeführt. Teilweise wurde auch hier die Temperatur auf 800°C gesteigert, um eventuell unter diesen Bedingungen die Stabilitätsverhältnisse zu klären.

Das aus den Versuchsergebnissen (Abbildung 13) abgeleitete pseudobinäre t-x-Diagramm (Abbildung 14) unterscheidet sich von dem vorher beschriebenen Diagramm (Abbildung 12) in einigen wesentlichen Punkten. Es tritt

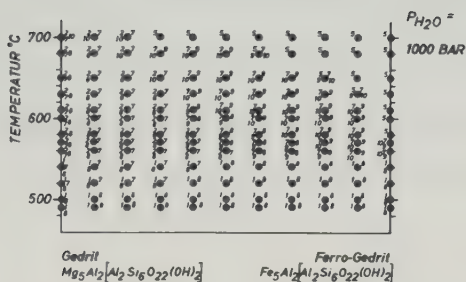


Abb. 13 Versuchspunkte auf der Mischkristallreihe der Gedrite mit max. Al-Ersatz (Ziffernerklärung siehe Abb. 1).

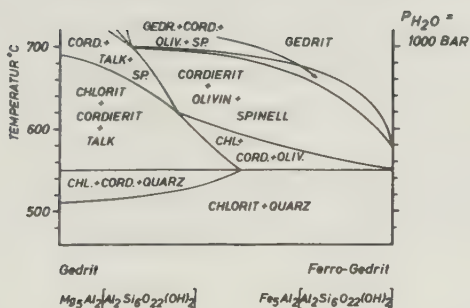
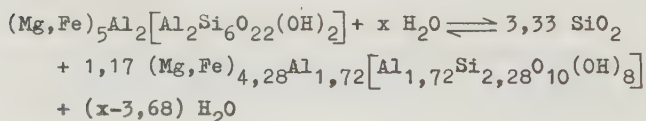


Abb. 14 Abgeleitetes pseudobinäres t-x-Diagramm der Gedrite mit max. Al-Ersatz.

zwar bei tiefen Temperaturen anstelle des Gedrites auch Chlorit + Quarz auf, diesmal sind aber die Chlorite auf der Eisenseite stabiler (bis $550^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ bei 1000 Bar H_2O -Druck) als die auf der Magnesiumseite des Diagramms (bis $500^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ bei 1000 Bar H_2O -Druck). Die Chlorite enthalten sowohl die 7 $\text{\AA}$ -Phase als auch die 14 $\text{\AA}$ -Phase. Die Bildung von Chlorit und Quarz verläuft nach folgender Gleichung (ohne Berücksichtigung des Natriums):



Die synthetisierten Chlorite sind aluminiumreicher als die Chlorite der Daphnit-Klinochlor-Mischkristallreihe. Während der Untersuchungen über die Mischkristallreihe, die der Ferro-Antigorit und der Ferro-Amesit bilden, konnten Eisenchlorite nur bis maximal $515^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ bei 1000 Bar H_2O -Druck hydrothermal hergestellt werden. Die hier auftretende Temperaturdifferenz kann durch die stabilisierende Wirkung des Natriums auf die Chlorit-Phase erklärt werden.

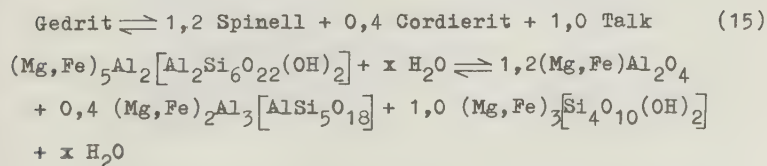
Auf der Magnesiumseite des Diagramms geht das Feld mit Chlorit + Quarz bei höherer Temperatur in ein Feld mit Chlorit + Quarz + Cordierit über. Der reine Magnesium-Cordierit tritt hier zuerst bei einer Temperatur von $510^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ zusammen mit Chlorit + Quarz auf. Die Vergesellschaftung von Cordierit + Chlorit + Quarz ist

bis $550^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ über ein Eisen-Magnesium-Verhältnis der Ausgangsmischung von 0 : 100 bis 55 : 45 stabil.

Auf der Eisenseite des Diagramms gehen Chlorit + Quarz ab $550^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$ in die Paragenese Chlorit + Cordierit + Olivin über. Der Chlorit wird hier unter Bildung von Olivin eisenärmer, und außerdem ist der Existenzbereich des eisenreichen Cordierites erreicht, so daß dieser mit Chlorit + Olivin koexistieren kann.

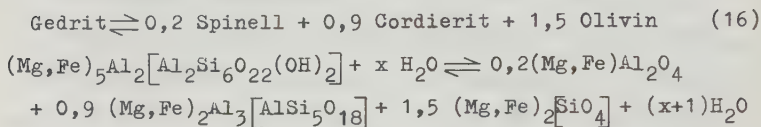
Das eben beschriebene Feld grenzt zur Magnesiumseite an ein Feld mit Chlorit + Cordierit + Talk, das sich durch Erhöhung der Temperatur aus der Paragenese Chlorit + Cordierit + Quarz gebildet hat. Hauptfänger für das Eisen in diesem Feld ist der Cordierit, der Talk enthält so gut wie kein Eisen. Die Paragenese Chlorit + Cordierit + Talk erreicht auf der Magnesiumseite eine Maximaltemperatur von $690^{\circ} \text{ C} \pm 10^{\circ} \text{ C}$.

Wenn der Chlorit bei höherer Temperatur instabil wird, geht die Vergesellschaftung von Cordierit + Chlorit + Talk über in die mit Cordierit + Talk + Spinell, wobei der Spinell sich auf Kosten des Chlorites bildet.



Mit zunehmenden Eisengehalt wird der Talk instabil, und an seine Stelle tritt der Olivin. Die Reaktionsgleichung

für die Paragenese Cordierit + Olivin + Spinell lautet
(ohne Berücksichtigung des Natriums):



Als Verbindungsfeld von der Paragenese Cordierit + Olivin + Spinell zum Existenzfeld des Gedrites tritt ein Übergangsfeld mit allen vier Phasen auf. Dieses Übergangsfeld ist sehr schmal und umfaßt einen Temperaturbereich von ungefähr 20° C.

Der Gedrit mit dem maximal möglichen Aluminiumersatz tritt ebenso wie der mit halbem maximalen Aluminiumersatz zuerst auf der Eisenseite bei 580° C $\pm$ 10° C auf. Die Kurve der unteren Stabilität steigt dann steil an und erreicht bei einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 20 : 80 eine Temperatur von 700° C. Von hier ab steigt die Kurve noch steiler an. Versuche bis zu 800° C haben gezeigt, daß keine magnesiumreicheren Gedrite als die mit einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von 20 : 80 entstehen. Bei diesen Versuchen bildeten sich nebenher immer große Mengen anderer Phasen. Meist sind dies Cordierit, Enstatit und Spinell. Ein reiner Magnesium-Gedrit konnte also in Übereinstimmung mit FAWCETT und YODER weder bei halbem noch bei maximalem Aluminiumersatz synthetisiert werden.

Beschreibung der auftretenden Phasen

In den hier untersuchten silikatischen Mischkristallreihen treten acht kristalline Phasen auf. Es sind dies: rhombische Hornblenden, Chlorit, Cordierit, Olivin, Spinell, Talk, Enstatit und Quarz. Diese Phasen sollen jetzt nacheinander beschrieben und ihre Hauptcharakteristiken, die für ihre Identifizierung wichtig sind, angeführt werden.

Rhombische Hornblenden (Anthophyllit, Gedrit)

Die synthetisierten Hornblenden konnten optisch und röntgenographisch gut identifiziert werden. Optisch zeigten sich unter dem Polarisationsmikroskop kurze Nadelchen ($20-50\mu$ lang, $1-1,5\mu$ dick), an denen folgende Werte für die Lichtbrechung gemessen wurden.

Anthophyllite

Fe^{2+} -Gehalt = 10 Mol-%	$1,615^{\pm} 0,005$
Fe^{2+} -Gehalt = 60 Mol-%	$1,670^{\pm} 0,005$

Gedrite (halber max. Al-Ersatz)

Fe^{2+} -Gehalt = 40 Mol-%	$1,672^{\pm} 0,005$
Fe^{2+} -Gehalt = 100 Mol-%	$1,716^{\pm} 0,005$

Gedrite (max. Al-Ersatz)

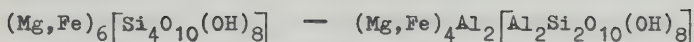
Fe^{2+} -Gehalt = 30 Mol-%	$1,673^{\pm} 0,005$
Fe^{2+} -Gehalt = 100 Mol-%	$1,725^{\pm} 0,005$

Röntgenographisch zeigen die synthetisierten Hornblenden drei starke Reflexe, mit denen eine sichere Identifizierung möglich ist. Es sind dies die Reflexe mit den hkl 210, 421 bzw. 440 und 610 bzw. 501. Alle anderen auftretenden Linien haben eine wesentlich schwächere Intensität. Zur genauen Messung wurden Aufnahmen mit einer Guinier-Kamera gemacht, die eine genaue Ausmessung der Reflexe ermöglicht. Die Verschiebung der Lage der Röntgenreflexe in Richtung zu kleineren d-Werten mit steigendem Aluminiumgehalt für die drei Hauptlinien zeigt folgende Tabelle (der Eisengehalt beträgt jeweils 40 Mol-%)

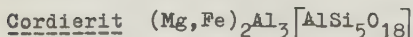
	Anthophyllit	Gedrit (halber max. Al-Ersatz)	Gedrit (max. Al-Ersatz)
hkl=210	$8,30 \pm 0,01 \text{ \AA}$	$8,26 \pm 0,01 \text{ \AA}$	$8,25 \pm 0,01 \text{ \AA}$
hkl= $\frac{421}{440}$	$3,250 \pm 0,005 \text{ \AA}$	$3,220 \pm 0,005 \text{ \AA}$	$3,210 \pm 0,005 \text{ \AA}$
hkl= $\frac{610}{501}$	$3,060 \pm 0,005 \text{ \AA}$	$3,040 \pm 0,005 \text{ \AA}$	$3,040 \pm 0,005 \text{ \AA}$

Die Bildung von Anthophyllit und Gedrit verläuft abgesehen von den Magnesium-Endgliedern der Mischkristallreihen schnell. Häufig bildet sich schon nach einer Versuchsdauer von drei Tagen eine rhombische Hornblende. Oft sind aber, besonders bei den eisenreichen Zusammensetzungen, geringe Mengen anderer Phasen (Cordierit, Olivin), die ebenfalls schnell kristallisieren, mit in den Syntheseprodukten vorhanden.

Chlorite



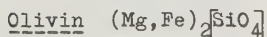
Die auftretenden Chlorite zeigen fast immer den 14 Å-Reflex, sie enthalten also zumindest die stabile 14 Å-Phase. Die Identifizierung der Chlorite erfolgte ausschließlich mit der röntgenographischen Phasenanalyse. Einkristalle wurden unter dem Mikroskop nicht beobachtet. Die Bildung von Chlorit aus Ausgangsmischungen mit geringen Aluminiumgehalten läuft sehr langsam ab. In Übereinstimmung mit FAWCETT und YODER zeigt sich, daß bei den Zusammensetzungen mit halbem maximalen Aluminiumersatz die Chloritbildung erst nach 14 Tagen bis drei Wochen einsetzt. Versuche von vier Wochen Dauer zeigen, daß die Menge an gebildetem Chlorit immer noch zunimmt. Das ist nicht nur auf der Magnesiumseite, die FAWCETT und YODER untersuchten, der Fall, sondern auch zur Eisen-seite hin zu beobachten. Aus der Mischkristallreihe mit maximalem Aluminiumersatz bilden sich die Chlorite wesentlich schneller.



Enthält das Syntheseprodukt Cordierit, so läßt sich dieser am einfachsten optisch bestimmen. Auch geringste Mengen lassen sich so sicher feststellen. Unter dem Mikroskop sieht man je nach Lage der Cordieritkristalle sechseckige oder rechteckige Umrisse. Gelegentlich kann man auch Verzwillingungen beobachten.

Der Cordierit kristallisiert noch besser als die rhombischen Hornblenden und sein Kristallvolumen ist wesentlich größer. Die Größe der Kristalle beträgt ungefähr $50\ \mu$ in der Länge, etwas weniger in der Dicke.

Die synthetisierten Cordierite wurden optisch nach den Bestimmungskurven von IIJAMA untersucht. Hierzu muß das Wasser aus der Cordieritstruktur entfernt werden. Dies geschieht durch Erhitzen auf 1000°C . Bei dieser Temperatur laufen Redox-Reaktionen zwischen dem zweiwertigen Eisen und dem Wasser ab. Es wird daher nach dem Erhitzen ein Teil des Eisens in dreiwertiger Form vorliegen. Da dieser Effekt in IIJAMAS Kurve nicht berücksichtigt wird, ist die Messung der Brechungsindices zur Bestimmung des Chemismus der Cordierite nicht genau.



Der Olivin wurde in den Syntheseprodukten immer röntgenographisch bestimmt. Seine chemische Zusammensetzung kann mit der Kurve, die von YODER und SAHAMA aufgestellt wurde, ermittelt werden. Dabei wird der 130-Reflex vermessen, dessen d-Wert von $2,7661\ \text{\AA}$ (Forsterit) bis $2,8293\ \text{\AA}$ (Fayalit) bei den synthetischen Olivinen ansteigt. Die Messungen sind auf $\pm 10\ \text{Mol-\%}$ genau. Unter dem Mikroskop konnten keine Olivinkristalle beobachtet werden.

Die Bildung von Olivin läuft sehr schnell ab. Schon bei einer Reaktionsdauer von einer Stunde bildet sich als erste Phase Olivin.

Spinell $(\text{Mg,Fe})\text{Al}_2\text{O}_4$

Spinelle treten in der aluminiumreichsten Mischkristallreihe auf. Sie sind hier ein Zersetzungsprodukt der Chlorite. Optisch konnten unter dem Mikroskop sehr kleine Spinellkristalle durch ihre hohe Lichtbrechung leicht von den anderen Mineralphasen unterschieden werden. Auch röntgenographisch ist der Spinell leicht zu identifizieren.

Talk $(\text{Mg,Fe})_3 [\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$

Der Talk bildet eine häufig metastabil auftretende Phase, besonders in den aluminiumfreien und aluminiumarmen Mischkristallreihen. Seine Bildung geht sehr schnell vonstatten, ebenso wie die des Olivins. Hat sich der Talk metastabil gebildet, so ist es schwierig, ihn wieder abzubauen. Unter dem Mikroskop sieht man, daß der Talk Nadeln bildet, die im Vergleich mit denen der Hornblenden länger und oft gebogen sind.

Enstatit $(\text{Mg,Fe})[\text{SiO}_3]$

Der Enstatit (Klinoenstatit) bildet sich bei der Synthese der Anthophyllite und bei hohen Temperaturen auf der Magnesiumseite der Gedrite. Auch der Enstatit bildet Nadeln, ähnlich denen der Hornblende, nur kürzer und dicker. Die Identifizierung erfolgte röntgenographisch.

Quarz SiO_2

Die in den Versuchen auftretende SiO_2 -Modifikation war stets der Tiefquarz. Er läßt sich optisch und röntgenographisch einwandfrei erkennen.

Das Eisen-Magnesium-Verhältnis koexistierender Phasen
im System $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

Das Eisen-Magnesium-Verhältnis in hydrothermal synthetisierten Mineralen kann auf drei verschiedene Arten ermittelt werden.

1. Durch eine chemische Analyse, wenn genügend Material zur Verfügung steht, und wenn die Mineralphasen sich gut voneinander trennen lassen.
2. Durch optische Eigenschaften, wenn die Korngröße der synthetisierten Minerale groß genug ist.
3. Durch die unterschiedliche Lage und Verschiebung von Linien im Röntgendiagramm.

Die erste Methode konnte wegen der geringen Substanzmenge (20 mg) und wegen der schlechten Abtrennbarkeit nicht benutzt werden. Mit der zweiten Methode konnte das Eisen-Magnesium-Verhältnis im Cordierit ungefähr (auf ± 20 Mol-% genau) bestimmt werden. Außer den Redox-Reaktionen zwischen dem Eisen und dem Wasser beim Entwässern der Cordieritkristalle, die die Ungenauigkeit der Bestimmung mitbedingen, spielen eine Reihe anderer Faktoren eine wichtige Rolle. Einmal bleibt der Natriumgehalt der Ausgangsmischungen unberücksichtigt. Da aber

Natrium sicher in die Cordieritstruktur eingebaut wird, ist die Bestimmung dadurch verfälscht. Hinzu kommt noch, daß der Cordierit selbst keine genaue stöchiometrische Zusammensetzung hat, sondern, daß eine Substitution von Magnesium bzw. Eisen und Silizium durch Aluminium erfolgen kann.

Mit der dritten Methode konnte der Anteil des Eisens im Olivin auf ± 10 Mol-% genau bestimmt werden.

Nicht bestimmbar war also das Eisen-Magnesium-Verhältnis in Talk, Spinell und Chlorit. Hier mußten entweder vereinfachende Annahmen gemacht werden (Talk enthält 100 % Magnesium, Chlorite liegen auf der Klinochlor-Daphnit-Mischkristallreihe), oder das Eisen-Magnesium-Verhältnis mußte rechnerisch ermittelt werden, wenn die Eisenkonzentration in den anderen Phasen bekannt ist (Spinell).

Bei der Darstellung der Zusammenhänge im Tetraeder ergaben sich Schwierigkeiten, da die entstehenden Flächen und Körper teilweise so kompliziert angeordnet waren, daß sie zwar dargestellt werden konnten, aber nicht mehr überschaubar waren.

Die Abbildungen 15, 16, 17 und 18 zeigen Schnitte bei verschiedenen Temperaturen durch das pseudobinäre t-x-Diagramm der Gedrite mit halbem maximalen Aluminiumersatz.

Bei 500° C (Abbildung 15) spaltet die gesamte Gedritreihe auf in Chlorit + Quarz. Das bedeutet, daß

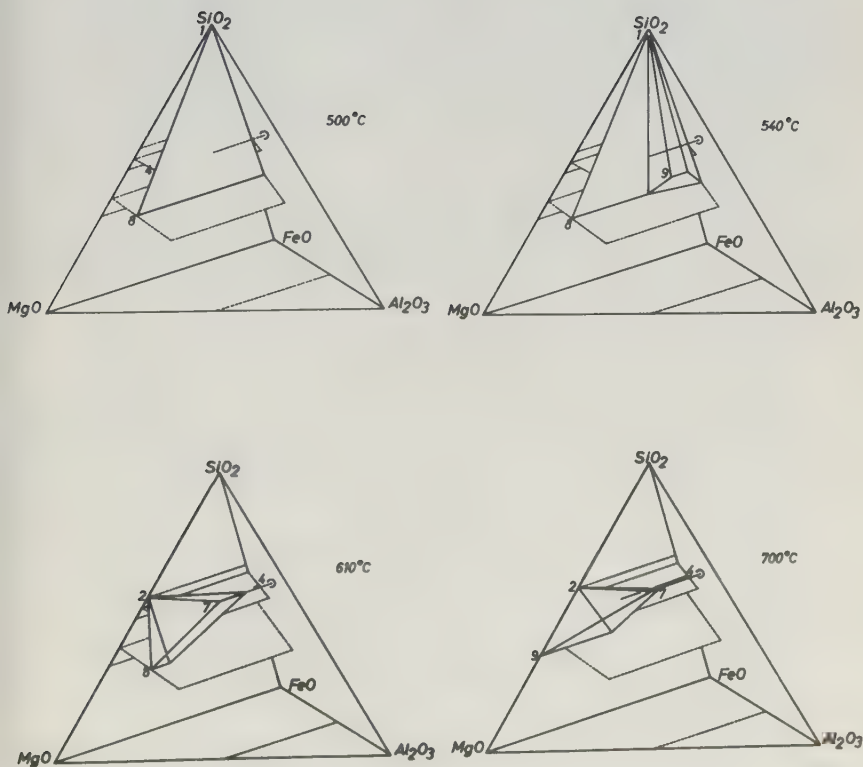


Abb. 15-18

Eisen-Magnesium-Verteilung bei verschiedenen Temperaturschnitten (500°C , 540°C , 610°C und 700°C) und 1000 Bar H_2O -Druck durch das pseudobinäre t-x-Diagramm der Gedrite mit halbem maximalen Al-Ersatz.

der entstandene Chlorit (Formel 9, Seite 23) vom Eisen- bis zum Magnesium-Endglied synthetisiert werden konnte. Bei 540° C (Abbildung 16) ist nur noch ein magnesiumreicher Teil der eben erwähnten Chlorite stabil (bis zu einem Magnesiumgehalt von 60 Mol-%). Aus eisenreicheren Mischungen entsteht neben Chlorit + Quarz zusätzlich Olivin. Das bedeutet, daß der Chlorit aluminiumreicher wird und auf die Daphnit-Klinochlor-Mischkristallreihe zuläuft.

Bei einer Temperatur von 610° C (Abbildung 17) ist die Felderaufteilung schon sehr viel schwieriger darzustellen. Breiten Raum nimmt auf der Magnesiumseite das Feld mit Chlorit + Cordierit + Talk ein. Auf der Eisen- seite ist der Gedrit stabil. Dazwischen liegen noch drei weitere Felder (Cordierit + Talk + Olivin; Cordierit + Olivin + Quarz; Gedrit + Cordierit + Olivin + Quarz), die nicht eingezeichnet wurden.

Bei einer Temperatur von 700° C (Abbildung 18) ist der Gedrit bis zu einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von ungefähr 30 : 70 stabil. Auf der Magnesiumseite koexistieren Cordierit + Talk + Olivin. Das Übergangsfeld zum Gedrit hin wurde nicht eingezeichnet.

Die Eisen-Magnesium-Verteilung in den verschiedenen Phasen auf der Gedrit-Mischkristallreihe mit maximalem Aluminiumersatz zeigen die Abbildungen 19, 20, 21 und 22.

Bei 500° C (Abbildung 19) treten wieder statt Gedrit Chlorit + Quarz auf. Der Chlorit (Formel 14, Seite 28) ist vom Eisen- bis zum Magnesium-Endglied stabil.

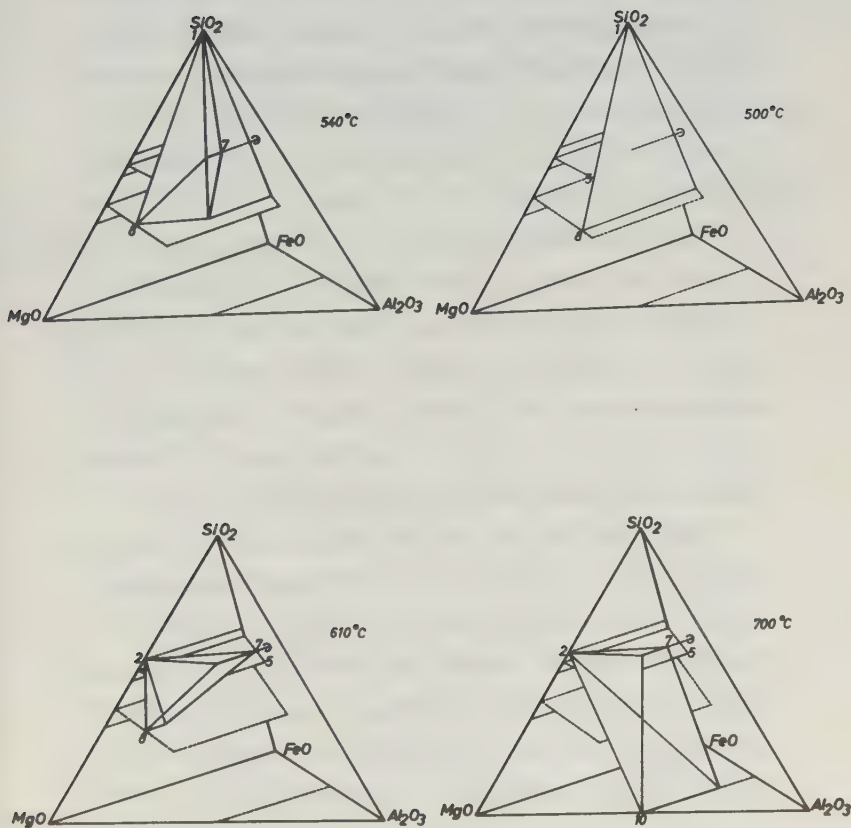


Abb. 19-22

Eisen-Magnesium-Verteilung bei verschiedenen Temperaturschnitten (500°C , 540°C , 610°C und 700°C) bei 1000 Bar H_2O -Druck durch das pseudobinäre t-x-Diagramm der Gedrite mit maximalem Al-Ersatz.

Eine Temperaturerhöhung um 40° C (Abbildung 20) verändert die Gleichgewichtsverhältnisse so, daß Cordierit auf der Magnesiumseite zusätzlich zu Chlorit + Quarz auftritt. Der Chlorit wird also auf der Magnesiumseite durch die Abgabe von Aluminium an den Cordierit aluminiumärmer und läuft auf die Daphnit-Klinochlor-Mischkristallreihe zu. Die Vergesellschaftung von Chlorit + Quarz ist bei 540° C bis zu einem Eisen-Magnesium-Verhältnis von ungefähr 60 : 40 stabil.

Bei einer Temperatur von 610° C (Abbildung 21) koexistieren auf der Magnesiumseite Chlorit + Cordierit + Talk. Dabei nimmt der Cordierit den Hauptteil des Eisens auf. Auf der Eisen Seite ist der Gedrit stabil. Die dazwischenliegenden Paragenesen (Chlorit + Cordierit + Olivin; Cordierit + Olivin + Spinell; Gedrit + Cordierit + Olivin + Spinell) wurden nicht eingezeichnet.

Der Gedrit ist bei 700° C (Abbildung 22) vom Eisenendglied bis zu einem Gedrit mit 80 Mol-% Magnesium stabil. Auf der Magnesiumseite treten statt Gedrit Cordierit + Talk + Spinell auf. Die dazwischenliegenden Felder enthalten nach vorläufigen Versuchen (bis zu Temperaturen von 800° C) Cordierit + Enstatit + Spinell bzw. Gedrit + Cordierit + Enstatit + Spinell.

Die Gleichgewichtsbeziehungen von Mineralen im System $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Gleichgewichtsbeziehungen koexistierender Phasen im System $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ wurden von YODER (1952) und von ROY und ROY (1955) untersucht. Bei beiden Autoren wurden eine Reihe von Punkten in dem eben genannten System bei verschiedenen Temperaturen und Drucken hydrothermal untersucht. Einige dieser Punkte lagen in der Nähe der Gedritzusammensetzungen. Ein binäres Feld mit Chlorit und Quarz wurde aber von beiden Autoren nicht gefunden. Darauf wiesen schon FAWCETT und YODER (1962) hin. Die Existenz dieses Feldes konnte in dieser Arbeit bestätigt werden.

Anhand von Untersuchungen, die im System $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ durchgeführt wurden, soll der Versuch gemacht werden, eine den neueren Ergebnissen entsprechende Felderaufteilung im Temperaturbereich von $500\text{-}700^\circ\text{C}$ bei 1000 Bar H_2O -Druck aufzustellen. Im Dreieck mit den Eckpunkten Spinell - $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ liegen keine Ergebnisse vor. Eine Felderaufteilung konnte daher nur für den linken Teil des Dreiecks mit den Eckpunkten MgO bzw. FeO, Quarz und Spinell aufgestellt werden. Es muß zusätzlich betont werden, daß der Gehalt an Natrium bei dieser Betrachtung nicht berücksichtigt wurde.

Die Gleichgewichtsbeziehungen im System $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

In diesem System ist im Temperaturbereich von $510\text{-}550^\circ\text{C}$ (Abbildung 23) fast die gesamte Mischkristallreihe der Chlorite stabil (Der Stabilitätsbereich der Antigorit-Amesit-Mischkristallreihe wurde der Arbeit von NELSON und ROY (1958) entnommen). Im Gegensatz zu den Ergebnissen von YODER (1952) und ROY (1955) ist von einem Teil der Chloritreihe aus ein binäres Feld mit Chlorit + Quarz stabil. Dieses Feld schneidet die Verbindungslinie vom Cordierit zum Talk ab. Zusätzlich entstehen dadurch die Felder mit den Paragenesen Chlorit + Cordierit + Quarz und mit Chlorit + Talk + Quarz.

Im Temperaturbereich von $550\text{-}660^\circ\text{C}$ (Abbildung 24) ist die Verbindung zwischen Cordierit und Talk wieder vorhanden. Dadurch entstehen die Vergesellschaftungen Cordierit + Talk + Quarz sowie Chlorit + Cordierit + Talk.

Oberhalb 660°C bis ungefähr 690°C (Abbildung 25) verändert sich das Bild grundlegend. Als neue stabile Phasen treten Anthophyllit und Enstatit auf. Die Chloritreihe schrumpft auf einen Punkt zusammen, der vom Klinochlor repräsentiert wird. Das Feld mit Chlorit + Cordierit + Talk bleibt bestehen. Dadurch werden die in diesem Temperaturbereich bei YODER (1952) vorhandenen Verbindungslinien vom Cordierit zum Enstatit und zum Forsterit abgeschnitten. Als neue Paragenesen entstehen die Felder mit Chlorit + Anthophyllit + Talk, mit Chlorit + Anthophyllit + Enstatit sowie mit Chlorit + Enstatit + Olivin.

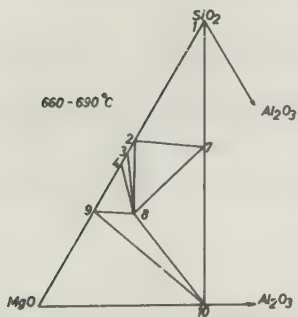
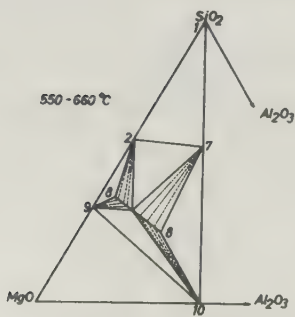
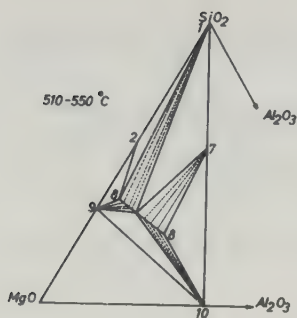


Abb. 23-25

Felderaufteilung im System $\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$
in Abhängigkeit von der Temperatur
(H_2O -Druck = 1000 Bar)

Die Gleichgewichtsbeziehungen im System $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

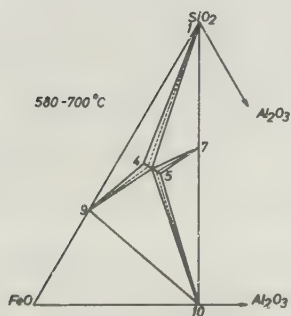
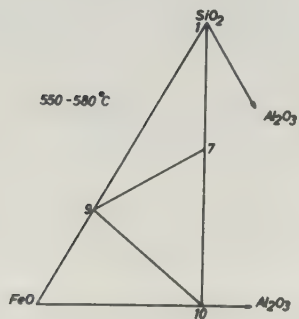
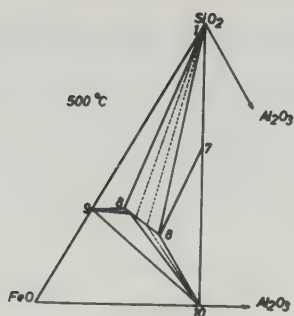
Bei einer Temperatur von 500°C (Abbildung 26) ist nicht die gesamte Mischkristallreihe der Eisenchlorite stabil (HELLNER, HINRICHSSEN, SEIFERT 1965). Auf der aluminiumfreien Seite konnte kein Chlorit synthetisiert werden. Die bei 500°C stabilen Chlorite koexistieren mit Quarz. Auf beiden Seiten schließen sich die Felder mit Chlorit + Olivin + Quarz und mit Chlorit + Cordierit + Quarz an.

Eine Erhöhung der Temperatur auf 540°C ändert nichts Wesentliches. Die Felderaufteilung bleibt die gleiche, das Feld mit Chlorit und Quarz wird schmaler.

Im Temperaturbereich von $550\text{-}580^\circ \text{C}$ (Abbildung 27) ist der Chlorit nicht mehr stabil. Es treten nur noch die wasserfreien Phasen Quarz, Spinell, Olivin und Cordierit auf. Die Felderaufteilung entspricht der im trockenen System bei einer Temperatur oberhalb 900°C (SCHAIRER und YAGI 1952).

Ab 580°C (Abbildung 28) wird der Gedrit stabil. Damit wird die Verbindungslinie zwischen Cordierit und Olivin unterbrochen. Es entstehen dadurch vier Dreiphasenfelder mit folgenden Vergesellschaftungen:

1. Quarz + Olivin + Gedrit
2. Quarz + Cordierit + Gedrit
3. Cordierit + Spinell + Gedrit
4. Olivin + Spinell + Gedrit



Anwendung der Untersuchungsergebnisse auf natürlich gebildete rhombische Hornblenden

In Abbildung 2 ist die chemische Variation der natürlich vorkommenden rhombischen Hornblenden dargestellt. Die natürlichen Anthophyllite und Gedrite enthalten fast immer Eisen und stellen ganz allgemein gesagt ein Mischkristall des Magnesiumendgliedes mit dem Eisenendglied dar. Reine Mg-Anthophyllite sind selten, sie enthalten oft Mangan und etwas Aluminium. Natürliche Anthophyllite mit mehr als 40 Mol-% Eisen sind nicht rhombisch, sondern gehören der monoklinen Cummingtonit-Grünerit-Gruppe an. KRANCK (1962) schreibt, daß sich bei Anwesenheit von Magnesium und Aluminium in der Natur bevorzugt Anthophyllit und nicht Cummingtonit bildet.

Reine Mg-Gedrite sind bisher in der Natur noch nicht gefunden worden. Dagegen wurde von SEKI und YAMASAKI (1957) ein reiner Ferro-Gedrit (maximaler Aluminiumersatz) beschrieben. Nach RAMBERG (1952) kann durch die stärkere Elektronegativität des Eisens gegenüber dem Magnesium in eisenreichen Hornblenden Silizium leichter durch Aluminium ersetzt werden als in magnesiumreichen.

Die oben getroffene Verallgemeinerung, daß die rhombischen Hornblenden Mischkristalle des Magnesiumendgliedes mit dem Eisenendglied sind, kann durch die von RABBITT (1948) gesammelten Analysen widerlegt werden.

Aus ihnen geht hervor, daß in natürlichem Material fast immer geringe Mengen von Calcium, Natrium, Kalium, Titan und Mangan vorhanden sind. Aluminiumreiche Anthophyllite zeigen fast immer einen hohen Gehalt an Natrium.

Direkte Vergleiche mit in der Natur vorkommenden Vergesellschaftungen konnten hier nicht gezogen werden. Als häufige Begleitminerale treten nämlich Cordierit und Plagioklas zusätzlich zum Anthophyllit und Gedrit auf. Häufig wurde Cordierit bei den Hydrothermaluntersuchungen gefunden, und in den Übergangsfeldern koexistieren Gedrit und Cordierit. Da aber keine Feldspäte in dem untersuchten System stabil sind, konnten keine direkten Parallelen zu natürlichen Vorkommen gezogen werden.

Der Sauerstoffpartialdruck spielt eine wichtige Rolle bei der Bildung und Umbildung von eisenhaltigen Mineralien in der Natur und im Labor. Da in dieser Arbeit unter reduzierenden Bedingungen gearbeitet wurde, konnte nur zweiwertiges Eisen in die verschiedenen Mineralphasen eingebaut werden. Welche Mineralvergesellschaftungen sich unter höheren Sauerstoffpartialdrücken bilden (Abbau von eisenreichen Olivinen!), wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Betrachtet man nun die Ergebnisse, die auf der Mischkristallreihe der rhombischen Hornblenden erzielt wurden, und wendet man diese Ergebnisse auf Abbildung 29 an, indem man die ungefähren Mittel des Variationsbe-

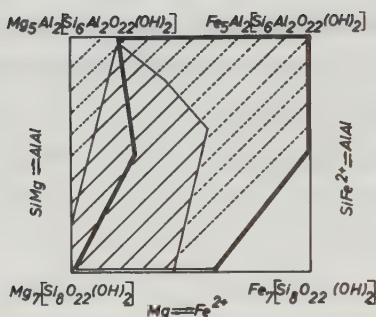


Abb. 29 Vergleich zwischen dem Variationsbereich synthetischer (Doppellinie) und natürlicher Hornblenden. (Schraffiertes Gebiet nach RABBITT (1948), gestrichelter Bereich nach SEKI und YAMASAKI (1957))

reiches der natürlichen rhombischen Hornblenden mit den Ergebnissen der Hydrothermaluntersuchungen vergleicht, kommt man zu folgenden Resultaten (Alle Temperaturangaben sind auf einen H_2O -Druck von 1000 Bar bezogen):

1. Die Anthophyllite enthalten im Durchschnitt der von RABBITT (1948) gesammelten Analysen 20 % der Ferro-Anthophyllit-Komponente. Mit dieser Zusammensetzung kommt man mit dem in der vorliegenden Arbeit aufgestellten Diagramm auf eine untere Bildungstemperatur von $620^{\circ} C$. Für extrem eisenreiche Anthophyllite sinkt diese Temperatur auf $560^{\circ} C$.

2. Die natürlichen Gedrite mit halbem maximalen Aluminiumersatz enthalten in der Natur im Durchschnitt 30 % des Ferro-Gedrit-Endgliedes. Nach dem aufgestellten pseudobinären t-x-Diagramm entspräche dieser Zusammensetzung eine untere Bildungstemperatur von ungefähr 720° C. Für sehr eisenreiche natürliche Gedrite liegt diese Temperatur bei 670° C.

3. Gedrite mit maximalem Aluminiumersatz haben in der Natur einen Variationsbereich vom Eisenendglied bis zu einem Gedrit mit 80 % des Magnesiumendgliedes. Für das Eisenendglied liegt die untere Bildungstemperatur bei 580° C, für den magnesiumreichsten natürlichen Gedrit bei 700° C.

Der von SEKI und YAMASAKI (1957) beschriebene Aluminium-Ferro-Anthophyllit (= Ferro-Gedrit mit maximalem Aluminiumersatz) wurde in einem Hornfels gebildet, der sich aus der Reaktion pelitischer Gesteine permischen Alters mit einem Granodiorit ableitet. Die in den Hydrothermalversuchen gefundene untere Bildungstemperatur eines Gedrites der oben genannten Zusammensetzung deckt sich gut mit der Temperaturangabe, die TURNER und VERHOOGEN (1960) für die Hornblende-Hornfels-Facies angeben. Der Temperaturbereich reicht nach ihnen

von 550-700° C bei einem gleichzeitigen H₂O-Druck von 1000-3000 Bar.

Für die Almandin-Amphibolit-Facies geben TURNER und VERHOOGEN (1960) einen Temperaturbereich von 550-750° C bei einem H₂O-Druck von 4000-8000 Bar an. Übergänge zur Hornblende-Hornfels-Facies können unter geringeren Drucken entstanden sein.

In dieser Arbeit wurde die unterste Bildungstemperatur einer rhombischen Hornblende mit 520° C $\pm$ 10° C bestimmt. Da eine rhombische Hornblende dieser Zusammensetzung in der Natur bisher noch nicht gefunden wurde, kann diese Temperatur nicht ohne weiteres als untere Grenze der Hornblende-Hornfels-Facies und der Almandin-Amphibolit-Facies angesehen werden. Direkte Vergleiche mit den natürlich vorkommenden Amphibolen lassen eine untere Temperaturgrenze von 560-580° C vermuten.

Zusammenfassung

Hydrothermale Untersuchungen an rhombischen Hornblenden im System $\text{MgO-FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ haben einige wichtige Ergebnisse gezeigt.

Durch die Variation des Eisen-Magnesium-Verhältnisses lassen sich Minerale, deren reine Magnesiumendglieder schwer (Anthophyllit) oder bisher gar nicht (Gedrit) synthetisiert werden konnten, bei geologisch "vernünftigen" Temperaturen darstellen. So wurde der Mg-Anthophyllit bei 660°C synthetisiert, bei einem Gehalt von 60 Mol-% Eisen wurde die Temperatur auf 520°C heruntergedrückt. Bei den Gedriten, wo kein Magnesiumendglied synthetisiert werden konnte, liegt die unterste Bildungstemperatur des reinen Eisenendgliedes bei 580°C .

Geringe Mengen von Nebengemengteilen können von entscheidender Wichtigkeit für die Stabilität von Mineralen sein. Erst durch geringe Zusätze von Natrium wurde die Bildung stabiler Gedrite ermöglicht.

Die Eisen-Magnesium-Verteilung kann auf der aluminiumfreien Mischkristallreihe der Anthophyllite gut gezeigt werden. Die Darstellung bei den aluminiumhaltigen Mischkristallen konnte nur im Tetraeder erfolgen. Hier sind die Zusammenhänge nicht so leicht überschaubar.

Für die Teilsysteme $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ und $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

wird eine den neueren Ergebnissen entsprechende Felder-
aufteilung vorgeschlagen. Dabei entsteht sowohl im
magnesiumhaltigen wie im eisenhaltigen System ein Gebiet,
in dem Chlorit und Quarz koexistieren.

Die Ergebnisse der Hydrothermaluntersuchungen
werden auf natürlich vorkommende Anthophyllite und
Gedrite angewendet. Für die untere Grenze der Hornblende-
Hornfels-Facies und der Almandin-Amphibolit-Facies
wird bei einem Wasserdampfdruck von 1000 Bar eine
Temperatur von 560°C bis 580°C vorgeschlagen.

Die vorliegende Arbeit entstand auf Anregung von Herrn Prof. Dr. E. HELLNER im Mineralogischen Institut der Universität Kiel und im Mineralogischen Institut der Universität Marburg.

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. E. HELLNER, danke ich für sein stetes Interesse und seine vielen Anregungen, die einen entscheidenden Einfluß auf die Fertigstellung dieser Arbeit hatten.

Herrn Dozent Dr. H.-H. LOHSE und Herrn Prof. Dr. O. ZEDLITZ danke ich für manche Hinweise, die mir meine Untersuchungen erleichtert haben.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft sei an dieser Stelle für die intensive apparative Unterstützung gedankt, ohne die diese Arbeit nicht hätte ausgeführt werden können.

Der gesamten Werkstatt des Institutes, besonders Herrn Feinmechanikermeister H. FRIEBERTSHÄUSER und dem Präparator, Herrn J. KÖSTER, danke ich für die Herstellung und Betreuung der apparativen Ausrüstung für die Hochdruckuntersuchungen.

Literaturverzeichnis

=====

- Berman, H. 1937. Constitution and classification of the natural silicates. Am. Mineral. 22 (Palache volume), 359.
- Bowen, N.L. and Tuttle, O.F. 1949. The system $MgO-SiO_2-H_2O$. Bull. Geol. Soc. Am. 60, 439.
- Boyd, F.R. 1959. Hydrothermal investigations of amphiboles. In "Researches in geochemistry" (ed. P.H. Abelson). New York.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J. 1963. Rock-forming minerals. 2, 211. London.
- Eugster, H.P. and Wones, D.R. 1962. Stability relations of the ferruginous biotite, annite. J. Petrology 3, 82.
- Fawcett, J.J. and Yoder, H.S., Jr. 1962. Quartz-chlorite assemblages in the system $MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$. Rep. Geophys. Lab. Carneg. Instn. 61, 89.
- Fyfe, W.S. 1962. On the relative stability of talc, anthophyllite, and enstatite. Am. J. Sci. 260, 460.
- Greenwood, H.J. 1963. The synthesis and stability of anthophyllite. J. Petrology 4, 317.

- Hellner, E., Hinrichsen, Th., Seifert, F. 1965. The study of mixed crystals of minerals in metamorphic rocks. In "Controls of metamorphism" (ed. W.S. Pitcher and G.W. Flinn). Edinburgh.
- Holser, W.T. and Kennedy, G.C. 1959. Properties of water. Part IV: Pressure - volume - temperature relations of water in the range 400-1000° C and 1000-1400 bars. *Am. J. Sci.* 257, 71.
- Iiyama, J.T. 1960. Recherches sur le rôle de l'eau dans la structure et le polymorphisme de la cordiérite. *Bull. Soc. franc. Minér. Crist.* 83, 155.
- Kranck, S.H. 1962. A study of phase equilibrium in a metamorphic iron formation. *J. Petrology* 2, 137.
- Layton, W. and Phillips, R. 1961. The cummingtonite problem. *Min. Mag.* 32, 659.
- Layton, W. 1964. Factors governing the natural and synthetic occurrence of members of the amphibole group of minerals. *N. Jahrb. f. Miner. Monatsh.* 5, 135.
- Nelson, B.W. and Roy, R. 1958. Synthesis of the chlorites and their structural and chemical constitution. *Am. Miner.* 43, 707.

- Rabbitt, J.C. 1948. A new study of the anthophyllite series. *Am. Miner.* 33, 263.
- Ramberg, H. 1952. Chemical bonds and distribution of cations in silicates. *J. Geol.* 60, 331.
- Remy, H. 1960. *Lehrbuch der anorganischen Chemie.* 1, 528. Leipzig.
- Roy, D.M. and Roy, R. 1955. Synthesis and stability of minerals in the system $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. *Am. Miner.* 40, 147.
- Schairer, J.F. and Yagi, K. 1952. The system $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$. *Am. J. Sci.*, Bowen vol., 471.
- Schreyer, W. and Yoder, H.S., Jr. 1964. The system $\text{Mg-cordierite - H}_2\text{O}$ and related rocks. *N. Jahrb. f. Miner.* 101, 271.
- Seki, Y. and Yamasaki, M. 1957. Aluminian ferro-anthophyllite from the Kitakami Mountainland, Northeastern Japan. *Am. Miner.* 42, 506.
- Turner, F.J. and Verhoogen, J. 1960. *Igneous and metamorphic petrology.* New York.
- Whittaker, E.J.W. 1960. The crystal chemistry of the amphiboles. *Acta cryst.* 13, 1, 291.
- Yoder, H.S., Jr. 1952. The $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system and related metamorphic facies. *Am. J. Sci.*, Bowen vol., 569.
- Yoder, H.S., Jr. and Sahama, Th.G. 1957. Olivine X-ray determination curve. *Am. Miner.* 42, 474.

DATEN UND ERGEBNISSE DER HYDROTHERMALVERSUCHE

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer ¹	Syntheseprodukte ¹
-----------	------------	-------------	--------------	---------------------	-------------------------------

Die Mischungsreihe Anthophyllit — Fe-Anthophyllit

Zusammensetzung = $7\text{MgO} + 8\text{SiO}_2$

395	500	1000	8		Tk + Ol
413	520	1000	7		Tk + Ol
402	550	1000	10		Tk + Ol
360	600	1000	7		Tk + Ol
738	630	1000	5		Tk + Ol
375	650	1000	7		Tk + Ol
853	660	1000	7		Tk + Ol + Anth
833	680	1000	7		Tk + Py + Anth
882	700	1000	10		Tk + Py + Anth

Zusammensetzung = $6,65\text{MgO} + 0,35\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

438	580	1000	7	MW	Tk + Ol
508	600	1000	5	MW	Tk + Ol
739	630	1000	5	MW	Tk + Ol
520	650	1000	8	MW	Tk + Ol + Anth
414	700	1000	7	MW	Anth

Zusammensetzung = $6,3\text{MgO} + 0,7\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

919	500	1000	12	MF	Tk + Ol
439	580	1000	7	MW	Tk + Ol
509	600	1000	5	MW	Tk + Ol + Anth
740	630	1000	5	MW	Tk + Ol + Anth
415	700	1000	7	MW	Anth

Zusammensetzung = $5,95\text{MgO} + 1,05\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

440	580	1000	7	MW	Tk + Ol
510	600	1000	5	MW	Tk + Ol + Anth
741	630	1000	5	MW	Tk + Ol + Anth
522	650	1000	8	MW	Anth
416	700	1000	7	MW	Anth

¹ Benutzte Abkürzungen:

Anth = Anthophyllit, Chl = Chlorit, Cord = Cordierit,
G = Gedrit, Ol = Olivin, Py = Pyroxen, Q = Quarz,
Sp = Spinell, Tk = Talk, MF = Magnetit-Eisen-Puffer,
MW = Magnetit-Wüstit-Puffer

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
--------------	---------------	----------------	-----------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $5,6\text{MgO} + 1,4\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

920	500	1000	12	MF	Tk + Ol
767	560	1000	7	MF	Tk + Ol
441	580	1000	7	MW	Tk + Ol + Anth
511	600	1000	5	MW	Tk + Ol + Anth
742	630	1000	5	MW	Tk + Ol + Anth
523	650	1000	8	MW	Anth
831	680	1000	7	MW	Anth

Zusammensetzung = $5,25\text{MgO} + 1,75\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

394	500	1000	8	MF	Tk + Ol
412	520	1000	7	MF	Tk + Ol
464	540	1000	7	MF	Tk + Ol
401	550	1000	10	MF	Tk + Ol
768	560	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
442	580	1000	7	MW	Tk + Ol + Anth
359	600	1000	7	MW	Tk + Ol + Anth
743	630	1000	5	MW	Anth
354	700	1000	7	MW	Anth

Zusammensetzung = $4,9\text{MgO} + 2,1\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

921	500	1000	12	MF	Tk + Ol
465	540	1000	7	MF	Tk + Ol
769	560	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
443	580	1000	7	MW	Tk + Ol + Anth
512	600	1000	5	MW	Anth
524	650	1000	8	MW	Anth
1004	680	1000	6	MW	Anth

Zusammensetzung = $4,55\text{MgO} + 2,45\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

757	500	1000	7	MF	Tk + Ol
466	540	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
770	560	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
444	580	1000	7	MW	Anth
782	700	1000	7	MW	Anth

Zusammensetzung = $4,2\text{MgO} + 2,8\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

758	500	1000	7	MF	Tk + Ol
467	540	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
771	560	1000	7	MF	Anth
514	630	1000	5	MW	Anth
746	630	1000	5	MW	Anth
526	650	1000	8	MW	Anth
1005	680	1000	6	MW	Anth

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
-----------	------------	-------------	--------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $3,85\text{MgO} + 3,15\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

448	540	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
446	580	1000	7	MW	Anth
784	700	1000	7	MW	Anth + Py + Q

Zusammensetzung = $3,5\text{MgO} + 3,5\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

923	500	1000	12	MF	Tk + Ol + Q
568	510	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
411	520	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
773	560	1000	7	MF	Anth
358	600	1000	7	MW	Anth
373	650	1000	7	MW	Anth
1006	680	1000	6	MW	Anth + Py + Q
785	700	1000	7	MW	Py + Q

Zusammensetzung = $3,15\text{MgO} + 3,85\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

761	500	1000	7	MF	Tk + Ol + Q
705	510	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
536	520	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
470	540	1000	7	MF	Anth
729	600	1000	5	MW	Anth
873	630	1000	7	MW	Anth
540	650	1000	7	MW	Anth + Py + Q
827	680	1000	7	MW	Anth + Py + Q
786	700	1000	7	MW	Py + Q

Zusammensetzung = $2,8\text{MgO} + 4,2\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

762	500	1000	7	MF	Tk + Ol + Q
706	510	1000	7	MF	Tk + Ol + Anth
537	520	1000	7	MF	Anth
775	560	1000	7	MF	Anth
651	580	1000	7	MW	Anth
691	620	1000	7	MW	Anth + Ol + Q
541	650	1000	7	MW	Anth + Py + Q
827	680	1000	7	MW	Anth + Py + Q
787	700	1000	7	MW	Py + Q

Zusammensetzung = $2,45\text{MgO} + 4,55\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

763	500	1000	7	MF	Tk + Ol + Q
707	510	1000	7	MF	Ol + Q + Anth
538	520	1000	7	MF	Ol + Q + Anth
472	540	1000	7	MF	Ol + Q + Anth
652	580	1000	7	MW	Ol + Q + Anth
731	610	1000	5	MW	Ol + Q + Anth
542	650	1000	7	MW	Py + Q + Anth
748	700	1000	7	MW	Py + Q + Ol

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
--------------	---------------	----------------	-----------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $2,1\text{MgO} + 4,9\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

764	500	1000	7	MF	Tk + Ol + Q
708	510	1000	7	MF	Ol + Q + Anth
693	620	1000	7	MW	Ol + Q + Anth
543	650	1000	7	MW	Py + Q
826	670	1000	4	MW	Py + Q + Ol

Zusammensetzung = $1,75\text{MgO} + 5,25\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

765	500	1000	7	MF	Tk + Ol + Q
709	510	1000	7	MF	Ol + Q + Anth
840	520	1000	27	MF	Ol + Q + Anth
474	540	1000	7	MF	Ol + Q + Anth
399	550	1000	10	MF	Ol + Q + Anth
654	580	1000	7	MW	Ol + Q + Anth
733	610	1000	5	MW	Ol + Q + Anth
877	640	1000	7	MW	Ol + Q + Py
352	700	1000	7	MW	Ol + Q + Py

Zusammensetzung = $1,4\text{MgO} + 5,6\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

766	500	1000	7	MF	Tk + Ol + Q
710	510	1000	7	MF	Ol + Q + Anth
695	620	1000	7	MW	Ol + Q + Anth
625	670	1000	7	MW	Py + Q + Ol

Zusammensetzung = $1,05\text{MgO} + 5,95\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

711	510	1000	7	MF	Ol + Q
656	580	1000	7	MW	Ol + Q + Anth
735	610	1000	5	MW	Ol + Q + Anth
879	640	1000	7	MW	Ol + Q + Py
484	700	1000	7	MW	Ol + Q + Py

Zusammensetzung = $0,7\text{MgO} + 6,3\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

927	500	1000	24	MF	Ol + Q
712	510	1000	7	MF	Ol + Q
657	580	1000	7	MW	Ol + Q
697	620	1000	7	MW	Ol + Q
963	650	1000	7	MW	Ol + Q
485	700	1000	7	MW	Ol + Q

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
-----------	------------	-------------	--------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $7\text{FeO} + 8\text{SiO}_2$

391	500	1000	8	MF	Ol + Q
409	520	1000	7	MF	Ol + Q
398	550	1000	10	MF	Ol + Q
356	600	1000	7	MW	Ol + Q
1093	640	1000	7	MW	Ol + Q
371	650	1000	7	MW	Ol + Q
351	700	1000	7	MW	Ol + Q

Die Mischungsreihe Gedrit — Fe-Gedrit
(mit halbem maxim. Al-Ersatz)

Zusammensetzung = $6\text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$ ¹

1689	500	1000	28	MF	Chl + Q
2041	520	1000	45	MF	Chl + Q
1917	540	1000	22	MF	Chl + Q
1989	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Tk
2017	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2057	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1949	610	1000	6	MW	Chl + Cord + Tk
2081	630	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1741	650	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2109	660	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2157	680	1000	9	MW	Chl + Cord + Tk
1837	700	1000	5	MW	Cord + Tk + Ol

Zusammensetzung = $5,4\text{MgO} + 0,6\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1688	500	1000	28	MF	Chl + Q
2040	520	1000	45	MF	Chl + Q
1916	540	1000	22	MF	Chl + Q
1988	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Tk
2016	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2056	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1948	610	1000	6	MW	Chl + Cord + Tk
2080	630	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1740	650	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2108	660	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2156	680	1000	9	MW	Cord + Tk + Ol
1836	700	1000	5	MW	Cord + Tk + Ol

¹ Zur besseren Übersicht wurde der Gehalt an Natrium nicht mit aufgeführt. Die genaue Zusammensetzung der Ausgangsmischungen ist aus Formel 8 (Seite 21) zu entnehmen.

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
-----------	------------	-------------	--------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $4,8\text{MgO} + 1,2\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1687	500	1000	28	MF	Chl + Q
2039	520	1000	45	MF	Chl + Q
1915	540	1000	22	MF	Chl + Q
1987	560	1000	11	MF	Chl + Q
2015	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2055	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1947	610	1000	6	MW	Chl + Cord + Tk
2079	630	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1739	650	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2107	660	1000	7	MW	Cord + Tk + Ol
2155	680	1000	9	MW	Cord + Tk + Ol
1835	700	1000	5	MW	Cord + Tk + Ol

Zusammensetzung = $4,2\text{MgO} + 1,8\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1686	500	1000	28	MF	Chl + Q
2038	520	1000	45	MF	Chl + Q
1914	540	1000	22	MF	Chl + Q
1986	560	1000	11	MF	Chl + Q
2014	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2054	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1946	610	1000	6	MW	Chl + Cord + Tk
2078	630	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1738	650	1000	7	MW	Cord + Tk + Ol
2106	660	1000	7	MW	Cord + Tk + Ol
2154	680	1000	9	MW	Cord + Tk + Ol
1834	700	1000	5	MW	Cord + Tk + Ol

Zusammensetzung = $3,6\text{MgO} + 2,4\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1685	500	1000	28	MF	Chl + Q
2037	520	1000	45	MF	Chl + Q
1913	540	1000	22	MF	Chl + Q
1985	560	1000	11	MF	Chl + Q
2013	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2053	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1945	610	1000	6	MW	Chl + Cord + Tk
2077	630	1000	7	MW	Cord + Tk + Ol
1737	650	1000	7	MW	Cord + Tk + Ol
2105	660	1000	7	MW	Cord + Ol + Q
2153	680	1000	9	MW	G
1833	700	1000	5	MW	G

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
-----------	------------	-------------	--------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $3\text{MgO} + 3\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1684	500	1000	28	MF	Chl + Q
2036	520	1000	45	MF	Chl + Q
1912	540	1000	22	MF	Chl + Q
1984	560	1000	11	MF	Chl + Q
2012	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2052	600	1000	7	MW	Cord + Tk + Ol
1944	610	1000	6	MW	Cord + Ol + Q
2076	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Q
1736	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
2104	660	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
2152	680	1000	9	MW	G
1832	700	1000	5	MW	G

Zusammensetzung = $2,4\text{MgO} + 3,6\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1683	500	1000	28	MF	Chl + Q
2035	520	1000	45	MF	Chl + Q
1911	540	1000	22	MF	Chl + Ol + Q
1983	560	1000	11	MF	Chl + Ol + Q
2011	580	1000	7	MW	Cord + Ol + Q
2051	600	1000	7	MW	Cord + Ol + Q
1943	610	1000	6	MW	Cord + Ol + Q
2075	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
1735	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
2103	660	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
2151	680	1000	9	MW	G
1831	700	1000	5	MW	G

Zusammensetzung = $1,8\text{MgO} + 4,2\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1682	500	1000	28	MF	Chl + Q
2034	520	1000	45	MF	Chl + Ol + Q
1910	540	1000	22	MF	Chl + Ol + Q
1982	560	1000	11	MF	Chl + Ol + Q
2010	580	1000	7	MW	Cord + Ol + Q
2050	600	1000	7	MW	Cord + Ol + Q
1942	610	1000	6	MW	Cord + Ol + Q + G
2074	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
1734	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
2102	660	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
2150	680	1000	9	MW	G
1830	700	1000	5	MW	G

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
--------------	---------------	----------------	-----------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $1,2\text{MgO} + 4,8\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1631	500	1000	28	MF	Chl + Q
2033	520	1000	45	MF	Chl + Ol + Q
1909	540	1000	22	MF	Chl + Ol + Q
1981	560	1000	11	MF	Chl + Ol + Q
2009	580	1000	7	MW	Cord + Ol + Q
2049	600	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
1941	610	1000	6	MW	Cord + Ol + Q + G
2073	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
1733	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
2101	660	1000	7	MW	G
2149	680	1000	9	MW	G
1829	700	1000	5	MW	G

Zusammensetzung = $0,6\text{MgO} + 5,4\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

1680	500	1000	28	MF	Chl + Q
2032	520	1000	45	MF	Chl + Ol + Q
1908	540	1000	22	MF	Chl + Ol + Q
1980	560	1000	11	MF	Cord + Ol + Q
2008	580	1000	7	MW	Cord + Ol + Q
2048	600	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
1940	610	1000	6	MW	Cord + Ol + Q + G
2072	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Q + G
1732	650	1000	7	MW	G
2100	660	1000	7	MW	G
2148	680	1000	9	MW	G
1828	700	1000	5	MW	G

Zusammensetzung = $6\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + 7\text{SiO}_2$

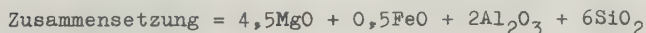
1679	500	1000	28	MF	Chl + Q
2031	520	1000	45	MF	Chl + Ol + Q
1907	540	1000	22	MF	Chl + Ol + Q
1979	560	1000	11	MF	Cord + Ol + Q
2007	580	1000	7	MW	G
2047	600	1000	7	MW	G
1939	610	1000	6	MW	G
2071	630	1000	7	MW	G
1731	650	1000	7	MW	G
2099	660	1000	7	MW	G
2147	680	1000	9	MW	G
1827	700	1000	5	MW	G

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
--------------	---------------	----------------	-----------------	--------	------------------

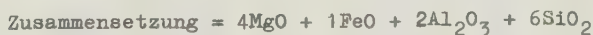
Die Mischungsreihe Gedrit — Fe-Gedrit
(mit maxim. Al-Ersatz)



1973	490	1000	31	MF	Chl + Q
1557	500	1000	63	MF	Chl + Q
1801	520	1000	21	MF	Chl + Cord + Q
1785	540	1000	9	MF	Chl + Cord + Q
2001	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Tk
1901	570	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2029	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2069	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1961	610	1000	1	MW	Chl + Cord + Tk
2093	630	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1765	650	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1865	680	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2207	700	1000	12	MW	Cord + Tk + Sp



1972	490	1000	31	MF	Chl + Q
1556	500	1000	63	MF	Chl + Q
1800	520	1000	21	MF	Chl + Cord + Q
1784	540	1000	9	MF	Chl + Cord + Q
2000	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Tk
1900	570	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2028	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2068	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1960	610	1000	1	MW	Chl + Cord + Tk
2092	630	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1764	650	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1864	680	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2206	700	1000	12	MW	Cord + Tk + Sp



1971	490	1000	31	MF	Chl + Q
1555	500	1000	63	MF	Chl + Q
1799	520	1000	21	MF	Chl + Cord + Q
1783	540	1000	9	MF	Chl + Cord + Q
1999	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Tk
1899	570	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2027	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2067	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1959	610	1000	1	MW	Chl + Cord + Tk
2091	630	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1763	650	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1863	680	1000	7	MW	Cord + Tk + Sp
2205	700	1000	12	MW	Cord + Tk + Sp

¹ Zur besseren Übersicht wurde der Gehalt an Natrium nicht mit aufgeführt. Die genaue Zusammensetzung der Ausgangsmischungen ist aus Formel 13 (Seite 26) zu entnehmen.

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
--------------	---------------	----------------	-----------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $3,5\text{MgO} + 1,5\text{FeO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2$

1970	490	1000	31	MF	Chl + Q
1554	500	1000	63	MF	Chl + Q
1798	520	1000	21	MF	Chl + Cord + Q
1782	540	1000	9	MF	Chl + Cord + Q
1998	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Tk
1898	570	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2026	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2066	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1958	610	1000	1	MW	Chl + Cord + Tk
2090	630	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
1762	650	1000	7	MW	Cord + Tk + Sp
1862	680	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2204	700	1000	12	MW	G

Zusammensetzung = $3\text{MgO} + 2\text{FeO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2$

1969	490	1000	31	MF	Chl + Q
1553	500	1000	63	MF	Chl + Q
1797	520	1000	21	MF	Chl + Q
1781	540	1000	9	MF	Chl + Cord + Q
1997	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Tk
1897	570	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2025	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Tk
2065	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Ol
1957	610	1000	1	MW	Chl + Cord + Ol
2089	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1761	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1861	680	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2203	700	1000	12	MW	G

Zusammensetzung = $2,5\text{MgO} + 2,5\text{FeO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2$

1968	490	1000	31	MF	Chl + Q
1552	500	1000	63	MF	Chl + Q
1796	520	1000	21	MF	Chl + Q
1780	540	1000	9	MF	Chl + Q
1996	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Tk
1896	570	1000	7	MW	Chl + Cord + Ol
2024	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Ol
2064	600	1000	7	MW	Chl + Cord + Ol
1956	610	1000	1	MW	Cord + Ol + Sp
2088	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1760	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1860	680	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2202	700	1000	12	MW	G

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
--------------	---------------	----------------	-----------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $2\text{MgO} + 3\text{FeO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2$

1967	490	1000	31	MF	Chl + Q
1551	500	1000	63	MF	Chl + Q
1795	520	1000	21	MF	Chl + Q
1779	540	1000	9	MF	Chl + Q
1995	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Ol
1895	570	1000	7	MW	Chl + Cord + Ol
2023	580	1000	7	MW	Chl + Cord + Ol
2063	600	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1955	610	1000	1	MW	Cord + Ol + Sp
2087	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1759	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1859	680	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp + G
2201	700	1000	12	MW	G

Zusammensetzung = $1,5\text{MgO} + 3,5\text{FeO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2$

1966	490	1000	31	MF	Chl + Q
1550	500	1000	63	MF	Chl + Q
1794	520	1000	21	MF	Chl + Q
1778	540	1000	9	MF	Chl + Q
1994	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Ol
1894	570	1000	7	MW	Chl + Cord + Ol
2022	580	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2062	600	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1954	610	1000	1	MW	Cord + Ol + Sp
2086	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1758	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1858	680	1000	7	MW	G
2200	700	1000	12	MW	G

Zusammensetzung = $1\text{MgO} + 4\text{FeO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2$

1965	490	1000	31	MF	Chl + Q
1549	500	1000	63	MF	Chl + Q
1793	520	1000	21	MF	Chl + Q
1777	540	1000	9	MF	Chl + Q
1993	560	1000	11	MF	Chl + Cord + Ol
1893	570	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2021	580	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2061	600	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1953	610	1000	1	MW	Cord + Ol + Sp
2085	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1757	650	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp + G
1857	680	1000	7	MW	G
2199	700	1000	12	MW	G

Vers. Nr.	Temp. (°C)	Druck (Bar)	Dauer (Tage)	Puffer	Syntheseprodukte
--------------	---------------	----------------	-----------------	--------	------------------

Zusammensetzung = $0,5\text{MgO} + 4,5\text{FeO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2$

1964	490	1000	31	MF	Chl + Q
1548	500	1000	63	MF	Chl + Q
1792	520	1000	21	MF	Chl + Q
1776	540	1000	9	MF	Chl + Q
1992	560	1000	11	MF	Cord + Ol + Sp
1892	570	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2020	580	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2060	600	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
1952	610	1000	1	MW	Cord + Ol + Sp
2084	630	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp + G
1756	650	1000	7	MW	G
1856	680	1000	7	MW	G
2198	700	1000	12	MW	G

Zusammensetzung = $5\text{FeO} + 2\text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{SiO}_2$

1963	490	1000	31	MF	Chl + Q
1547	500	1000	63	MF	Chl + Q
1791	520	1000	21	MF	Chl + Q
1775	540	1000	9	MF	Chl + Q
1991	560	1000	11	MF	Cord + Ol + Sp
1891	570	1000	7	MW	Cord + Ol + Sp
2019	580	1000	7	MW	G
2059	600	1000	7	MW	G
1951	610	1000	1	MW	G
2083	630	1000	7	MW	G
1755	650	1000	7	MW	G
1855	680	1000	7	MW	G
2197	700	1000	12	MW	G

L e b e n s l a u f

=====

Am 4. August 1938 wurde ich, Thomas Joachim Hinrichsen als Sohn des Schiffbau-Ingenieurs August Hinrichsen und seiner Ehefrau Elisabeth, geb. Voigtländer, in Lübeck geboren.

Von 1944 bis 1951 besuchte ich in Lübeck die Volksschule.

Von 1951 bis 1958 war ich Schüler am Johanneum-Gymnasium in Lübeck. Dort legte ich im Februar 1958 die Reifeprüfung ab.

Im Sommersemester 1958 begann ich mit meinem Studium der Naturwissenschaften in Saarbrücken und bestand 1961 das Diplom-Vorexamen in Geologie.

Dann wechselte ich meinen Studienort und ging nach Kiel. 1961 bekam ich das Thema meiner Diplomarbeit und bestand im Sommersemester 1963 das Examen im Hauptfach Mineralogie.

Im Frühjahr 1964 zog ich mit dem Mineralogischen Institut von Kiel nach Marburg. Von 1964 bis 1965 war ich mit der Vertretung einer Assistentenstelle beauftragt, seit 1965 bin ich als wissenschaftlicher Angestellter im Mineralogischen Institut beschäftigt.

Meine akademischen Lehrer waren die Herren Professoren und Dozenten: ALTMANN, BARTH, BARTHEL, PESSON, EISTERT, FIRTION, von FRAGSTEIN, HELLNER, JUZA, KOCKEL, de LATIN, LOHSE, NÖTH, RAMBERG, ROST, SAALFELD, SEIBOLD, SCHMAHL, SCHMIDT, STAHL, WEISE, WULFF.

